

Le réchauffement climatique (le changement climatique) : réponse à quelques questions élémentaires

Jean-Marc JANCOVICI
Ingénieur Conseil

www.manicore.com

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Aspects physiques du changement climatique : vue d'ensemble

[Qu'est-ce que l'effet de serre ?](#)

[Pourquoi dit-on que la planète se réchauffe ?](#)

[Ce réchauffement a-t-il commencé ?](#)

[L'effet de serre, c'est différent du trou dans la couche d'ozone ?](#)

[Variation du climat et augmentation de l'effet de serre due à l'homme, c'est pareil ?](#)

[Météo et climat, c'est pareil ?](#)

Les gaz à effet de serre - généralités

[Quels sont les gaz à effet de serre ? Quelles sont leurs contributions à l'effet de serre ?](#)

[Peut-on dire que le gaz carbonique est un poison ?](#)

[Qu'est-ce que les aérosols ? - Quel est le rôle des nuages ?](#)

[La responsabilité de l'homme est-elle établie pour le surplus de CO₂ ?](#)

Prédire l'avenir

[Un changement de climat, c'est juste un changement de température moyenne ?](#)

[Qu'est-ce qu'un modèle climatique ? Quelles sont leurs premières conclusions ?](#)

[Peut-on faire confiance aux modèles climatiques ?](#)

[De combien la température peut-elle monter ?](#)

[Où nous situons-nous dans l'échelle des températures par rapport au passé ?](#)

[Les températures et les précipitations vont-elles évoluer partout de la même manière ?](#)

Les émissions du XXI^e siècle "comptent-elles" pour la température en 2100 ?
Cesser rapidement d'émettre des gaz à effet de serre suffirait-il à tout arrêter ?

Les risques

Savons nous où est le "seuil de danger" ?
Les phénomènes extrêmes de toute nature vont-il augmenter à l'avenir ?
Les courants marins vont-ils changer ?
Que risquent les écosystèmes terrestres ?
Allons-nous transformer l'océan en un lac d'acide ?
Allons nous être tous malades ?
Les océans vont-ils tout submerger ?
Le "trou dans la couche d'ozone" va-t-il s'agrandir ?
Les hommes sauront-ils rester sereins ?
N'y aura-t-il pas des régions épargnées par le changement climatique ?
Ne peut-on compter sur une "bonne surprise" qui calmera le processus ?
Que vont devenir les "puits de carbone" ?
Faut-il redouter les hydrates de méthane ?
Effet de serre et tabac : une petite comparaison pédagogique...

Le cycle du carbone

Les "puits de carbone" ne vont-ils pas absorber le surplus de CO₂ ?

[Ne suffit-il pas de planter des arbres pour compenser les émissions ?](#)

Faut-il croire les scientifiques qui nous parlent de l'avenir du climat ?

[Qui sont les scientifiques étudiant l'avenir du climat ?](#)

[Depuis combien de temps "sait-on" que l'homme agit ou agira sur le climat ?](#)

[Qu'est-ce que le GIEC ?](#)

[Faut-il croire tous ceux qui s'expriment dans la presse ?](#)

[Les journalistes sont-ils de bons porte-parole des experts ?](#)

Les gaz à effet de serre et nous

[Comment évoluent actuellement les émissions de gaz à effet de serre ?](#)

[A quoi ressemble notre consommation énergétique actuellement ?](#)

[Quels actes de la vie courante "font" de l'effet de serre ?](#)

[Combien de gaz à effet de serre dans notre assiette ?](#)

[Combien de gaz à effet de serre dans notre poubelle ?](#)

[Quelles émissions de gaz à effet de serre pour la famille de l'auteur ?](#)

Agir collectivement : quand, comment, et jusqu'où ?

[La disparition des énergies fossiles ne va-t-elle pas régler le problème "tout seul" ?](#)

Ne faut-il pas "attendre de voir" avant de faire quelque chose ?
Quels sont les niveaux de réduction souhaitables ?
Que signifie concrètement d'arrêter la hausse du CO2 dans l'air ?
Suffit-il de laisser sa voiture au garage ?
Ne serons nous pas sauvés par la technique ?
Ne suffit-il pas de mettre le gaz carbonique dans un grand trou ?
Si la collectivité souhaite agir, que peut-elle faire ?
Quels sont les objectifs des négociations internationales ?
Les Américains sont-ils les rois des affreux ?
Qui devrait réduire en premier ?

Agir individuellement, chez soi ou dans son entreprise

Effectuer sa "BA" pour agir contre le changement climatique : quelques ordres de grandeur
Je suis chef d'entreprise ou directeur d'une administration : puis-je faire quelque chose ?
La compensation, drôle de bonne idée ou belle escroquerie ?
Manicore, société d'utilité publique... ou gros pollueur ?
Faut-il être optimiste ou pessimiste pour l'aptitude au changement "des gens" ?

Existe-t-il un monde idéal ?

Existe-t-il des énergies sans CO2 ?
Que peut-on attendre des voitures électriques ?

Pourrions nous vivre juste comme aujourd'hui avec juste des renouvelables ?
Que peut-on dire sur un monde qui serait "énergétiquement vertueux" ?

Effet de serre et économie

La croissance économique "fait-elle" de l'effet de serre ?
Peut-on justifier de ne pas agir parce que cela coute trop cher ?
Ne serions nous pas déjà en décroissance ?
Combien plus cher avec une taxe carbone ?
Qu'est-ce que les permis d'émission ?
Qu'est-ce que l'équation de Kaya ?

Effet de serre et choix pour l'avenir en France

Faut-il rajouter des aéroports en France ?
Faut-il sortir du nucléaire ?

Un peu de lecture

Bibliographie

Remerciements

Qu'est-ce que l'effet de serre ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Qu'est-ce qu'une serre ? Chacun sait que c'est un bâtiment couvert de vitres, qui laisse bien passer la lumière du soleil, mais empêche que la chaleur qui se forme à l'intérieur de la serre, sous l'effet de la lumière du soleil, ne se dissipe trop vite vers l'extérieur. Deux effets contribuent à retenir la chaleur prisonnière à l'intérieur de la serre :

- un effet purement mécanique : les vitres empêchent tout simplement l'air chaud d'aller ailleurs ! C'est pour cela que l'on trouve des serres faites d'une simple bâche de plastique, qui ne procurent que cet effet "mécanique",
- un "effet de serre", qui correspond en fait à une opacité du verre à l'infrarouge : en réponse à l'énergie reçue de l'extérieur, l'intérieur de la serre chauffe et émet des infrarouges. Or ces infrarouges émis par l'intérieur de la serre sont interceptés par le verre, qui est un matériau très opaque pour ce rayonnement particulier, ce qui empêche l'énergie de dissiper vers l'extérieur et fait monter la température à l'intérieur.

Il existe au sein de notre atmosphère des gaz (les "gaz à effet de serre"), présents en petite quantité, qui jouent pour notre planète exactement le même rôle que les vitres de la serre dans l'exemple ci-dessus. Ce gaz n'empêchent pas la lumière du soleil d'arriver jusqu'à nous (ils sont très transparents au rayonnement solaire), mais empêchent le rayonnement infrarouge émis par le sol de repartir vers l'espace. Ils font ainsi office de "couvercle" en retenant prisonnière, en quelque sorte, l'énergie - donc une température élevée - près du sol.

Cependant, l'analogie avec la serre ne vaut que pour la partie "opacité aux infrarouges" : les gaz à effet de serre n'empêchent pas physiquement le déplacement de l'air !

Qu'est-ce qu'un gaz à effet de serre ?

Fondamentalement, un gaz à effet de serre est un gaz qui est partiellement opaque au rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre. La majeure partie d'entre eux sont transparents au rayonnement que la Terre reçoit du Soleil, mais pas tous : l'ozone, en particulier, est opaque aux ultraviolets reçus du soleil. Les divers encadrés ci-dessous précisent cette caractéristique.

Les deux gaz à effet de serre les plus importants (mais il y en a d'autres) sont parfaitement naturels et présents de longue date dans notre atmosphère :

- la vapeur d'eau, qui occupe environ 0,3% de l'atmosphère, y est présente depuis qu'il y a de l'eau à la surface de la terre, c'est à dire 4 milliards d'années,
- le gaz carbonique, qui occupe actuellement 0,037% de l'atmosphère, mais cette proportion a beaucoup varié au cours des âges.

Si le chauffage supplémentaire du sol lié à cet effet de serre n'existait pas, la surface terrestre aurait une température moyenne de -18°C plutôt que de +15 °C, rendant notre planète tout à fait inhospitalière pour les bipèdes que nous sommes. L'effet de serre de notre atmosphère est donc un **phénomène bénéfique**.

Le danger qui est désigné par le terme "effet de serre" correspond à un abus de langage. Il faut lui préférer le terme de "**réchauffement climatique**", ou mieux encore de "**changement climatique**". Ce qui est dangereux n'est pas le phénomène lui-même, parfaitement naturel et essentiel à notre existence, mais sa modification rapide du fait de l'homme, modification qui elle est porteuse de graves dangers potentiels. Comme on le verra plus loin, cette modification ne se résume pas à un changement de température, loin s'en faut.

Quelques explications un peu plus techniques

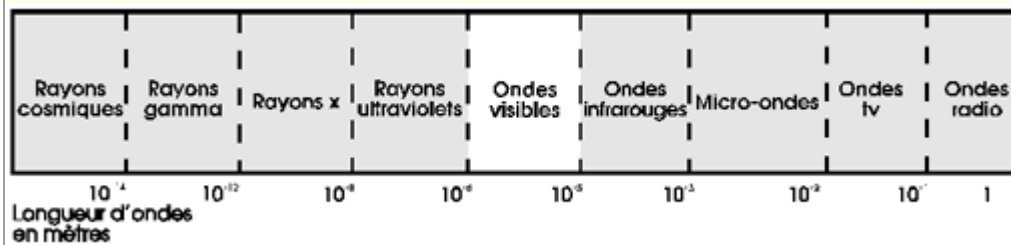
Notre étoile, le soleil, nous envoie chaque jour une quantité considérable d'énergie : en une année, l'humanité toute entière consomme une énergie qui représente moins de 3% de ce que le Soleil nous envoie chaque jour.

Cette énergie solaire nous arrive sous forme de rayonnement électromagnétique, dont la lumière fait partie.

Les rayonnements électromagnétiques

- la lumière,
- les infrarouges,
- les ultraviolets,
- les rayons X,
- les ondes radio,
- les micro-ondes qui circulent dans les fours de même nom,
- et, pour ceux qui s'intéressent à la radioactivité, les rayons gamma,

sont des rayonnements qui sont tous de même nature : ils forment la vaste famille des rayonnements électromagnétiques.



Tout corps ayant dépassé le zéro absolu (c'est à dire -273,15 de nos degrés !) émet du rayonnement électromagnétique pour dissiper une partie de son énergie :

- S'il n'est pas très chaud, il n'émettra que des ondes radio ; c'est le cas de certains objets dans l'espace (où effectivement il ne fait pas chaud : - 270 degrés Celsius !),
- s'il est plus chaud il émet aussi des infra-rouges (par exemple notre corps émet des infrarouges, même la nuit : c'est grâce à cela que l'on peut construire des caméras à infrarouges qui permettent de nous "voir la nuit" en captant ces infrarouges),
- s'il est encore plus chaud (à partir de 700° C, par exemple un morceau de métal chauffé "au rouge"), il émettra aussi de la lumière visible ; dans nos ampoules électriques nous ne faisons rien d'autre que de chauffer à l'électricité un filament de métal vers les 2700 °C, ce qui lui fait rayonner de la lumière visible,
- encore plus chaud, il émettra aussi des ultraviolets, c'est le cas du soleil,
- encore plus chaud, il émettra des rayons X : c'est le cas de certains corps célestes.

Le soleil, qui est très chaud (6.000 °C à la surface), nous envoie un rayonnement composé de :

- 10% d'ultra-violets (dont une bonne partie est arrêtée par la fameuse "couche d'ozone", heureusement pour nous car les ultraviolets, qui sont des rayonnements "énergiques", sont néfastes à la vie : ils ont tendance à "casser", dans les cellules vivantes, des liaisons chimiques indispensables),
- 40% de lumière visible
- 50% d'infrarouges.

La Terre, qui n'est pas très chaude (15 ° C), émet uniquement des infrarouges (qui ne sont pas les mêmes que ceux du soleil).

Or un matériau peut très bien être transparent pour l'un de ces rayonnements et pas pour les autres : notre propre corps, par exemple, est transparent pour les rayons X (qui passent bien à travers ; c'est

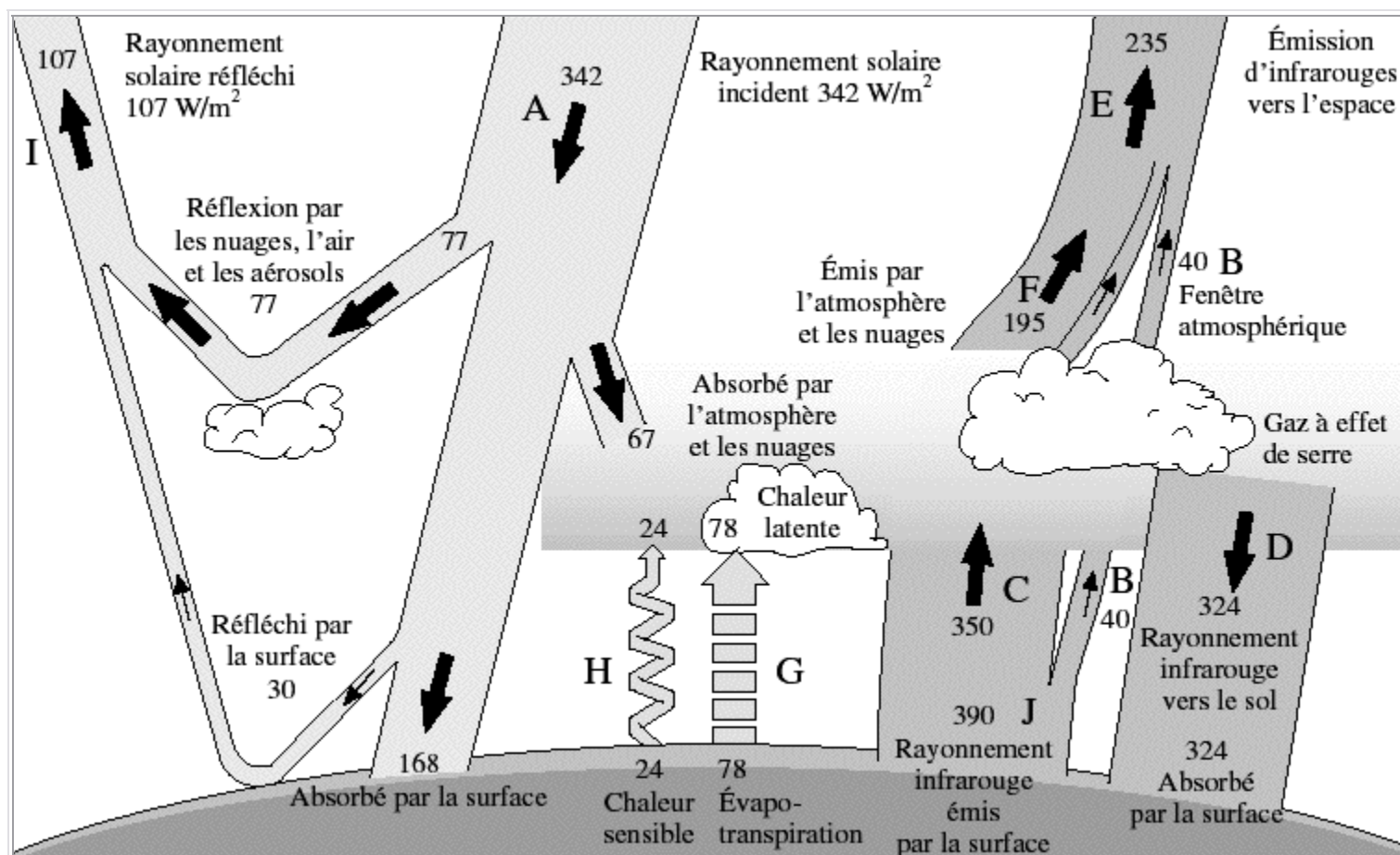
pour cela que l'on s'en sert en radiographie), mais ne l'est pas pour la lumière visible (sinon nous ne dirions pas : ôte-toi de là, je ne vois rien !).

Lorsque le rayonnement solaire arrive sur notre planète, 30% est directement réfléchi vers l'espace, par les nuages (20%), les diverses couches de l'atmosphère (6%), et la surface de la terre (4%), qui comporte notamment une part non négligeable de glace - les calottes polaires - qui sont particulièrement réfléchissantes.

Le reste est absorbé par les divers composants de notre planète (sol, océans, atmosphère, cf. schéma ci-dessous), puis finalement réémis vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. En effet, tout comme notre peau chauffe si on la met au soleil, la surface de la Terre et l'atmosphère chauffent lorsqu'elles sont exposées à la lumière (en captant son énergie), et en retour émettent des infrarouges.

Les gaz à effet de serre, qui avaient laissé passer la lumière sans encombre, ont par contre la propriété d'absorber une partie de ces infrarouges. Ce faisant, ils en récupèrent l'énergie et chauffent. Tout comme la surface de la terre, ils vont dissiper cette énergie en émettant eux aussi infrarouges, dont une partie retourne vers le sol, le chauffant donc une deuxième fois après que le soleil l'ait fait une première.

Cette interception de chaleur conduit donc ces gaz à effet de serre, puis l'atmosphère basse (on parle de troposphère), puis la surface de la Terre, à être plus chauds que si le rayonnement infrarouge passait à travers l'atmosphère sans être intercepté. Bien sûr, le système finit toujours par s'équilibrer, mais il s'équilibre avec une température de surface supérieure à celle qu'il aurait si ces gaz n'étaient pas là.



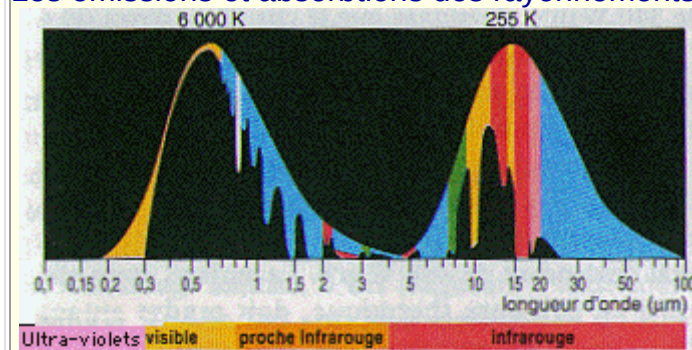
Fonctionnement général simplifié de l'atmosphère. Les chiffres représentant la valeur moyenne, temporelle (sur l'année) et géographique (sur la surface de la planète) en Watts par mètre carré, de chaque flux d'énergie représenté.

Le "réchauffement climatique" peut, en première approximation, être résumé de la manière suivante : quand on augmente la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, cela augmente son opacité au rayonnement terrestre, et donc le terme B (le rayonnement infrarouge terrestre qui parvient à s'échapper directement vers l'espace) diminue. Corrélativement le terme C augmente, ce qui conduit

l'atmosphère à recevoir plus d'énergie. Elle rayonne donc plus, et le terme D augmente aussi.
Le sol va donc recevoir une énergie accrue et sa température moyenne va monter.
Schéma tiré de "[l'avenir climatique](#)", rédigé par votre serviteur, et paru au Seuil en mars 2002

Encore plus de technique : revenons aux rayonnements électromagnétiques (pour ceux qui le souhaitent !)

Les émissions et absorptions des rayonnements du soleil et de la Terre



Distribution du rayonnement du soleil (6000 K) et de la Terre (255 K) et représentation simplifiée de l'absorption par les gaz à effet de serre. Source : Robert Sadourny, le Climat de la Terre, Flammarion, Collection Domino

Vapeur d'eau (H_2O)	Gaz carbonique (CO_2)	Ozone (O_3)
Méthane (CH_4)	Protoxyde d'azote (N_2O)	Oxygène (O_2)

On a représenté sur le diagramme ci-dessus deux courbes, qui représentent la répartition par longueur d'onde des rayonnements émis par le soleil (6000 K, car le soleil est à 6.000 Kelvin en surface) et par la Terre (255 K, c'est à dire la température de la Terre sans effet de serre : 255 K, c'est à peu près $-18^{\circ}C$; la distribution du rayonnement pour $+15^{\circ}C$, c'est à dire 287 K, est de toute façon quasiment identique).

Rappelons que la température en kelvins (K) est égale à la température en degrés Celsius (les degrés "normaux", symbole $^{\circ}C$) plus 273,15. Il s'agit juste d'un décalage du zéro des températures.

Ces deux courbes sont normalisées, c'est à dire que on a mis leur maximum à la même hauteur (sinon celle concernant le Soleil serait un million de fois plus haute que celle de la terre, ce qui

induirait quelques petits problèmes de lisibilité...).

Les bandes de couleur représentent (une couleur par gaz) la proportion de l'énergie rayonnée qui est interceptée par les gaz à effet de serre, et ce pour chaque longueur d'onde. En fait il y a quelques recouvrements, mais ils ne sont pas représentés sur le schéma pour simplifier les choses (simplification acceptable pour une première idée de la chose).

On constate assez facilement, en regardant ce petit diagramme :

- que le "pic" du rayonnement solaire est dans le visible (les gammes : ultra-violet, visible, proche infrarouge, infra-rouge lointain, sont indiquées en bas du diagramme), alors que la Terre n'émet rien d'autre que de l'infrarouge lointain,
- que les infrarouges reçus du soleil sont des proches infrarouges, qui ne sont pas les mêmes - et sont moins arrêtés - que ceux émis par la Terre,
- que le rayonnement ultra-violet du soleil est quasiment totalement arrêté par l'ozone (à gauche), grâce à quoi nous sommes en vie,
- que la lumière visible du soleil est très peu interceptée par l'atmosphère (ce qui se constate facilement !),
- que tout rayonnement émis par la Terre est partiellement ou totalement absorbé par un gaz à effet de serre (il y a "de la couleur" sous chaque longueur d'onde), au sein desquels c'est de loin la vapeur d'eau qui en arrête le plus (bleu clair à droite),
- que c'est bien parce que les longueurs d'onde arrêtées par les divers gaz à effet de serre sont différentes (en première approximation) que les effets des gaz se cumulent : si tous les gaz à effet de serre agissaient sur les mêmes plages de fréquence on voit bien que cela "saturerait" très vite sur ces fréquences mais que cela laisserait le rayonnement repartir sans encombre pour le reste,

➤enfin que de rajouter des gaz à effet de serre a un impact d'autant plus important que la proportion du rayonnement déjà absorbé par ce gaz est faible : l'effet est d'autant plus important qu'il reste "du noir vers le bas" et que la bande d'absorption est large sur la courbe.

En savoir encore plus sur la physique du phénomène (pour lecteur averti) : un article sur le site de l'[Ecole Normale de Lyon](#)

Pourquoi dit-on que la planète se réchauffe ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Imaginons un lac de montagne. Lorsque tout est à l'équilibre, il reçoit autant d'eau de l'amont qu'il en déverse vers l'aval et son niveau est constant.

Au moment de la fonte des neiges, le débit entrant va augmenter. Le lac va réagir en montant son niveau jusqu'à ce que le débit sortant (qui augmente avec la hauteur d'eau) devienne égal au débit entrant, puis va se stabiliser à ce niveau. Si, à l'inverse, le débit entrant diminue (par exemple l'été), le lac va baisser jusqu'à ce que le débit sortant devienne faible (l'eau va tout juste affleurer la retenue de sortie) puis il va se stabiliser à ce niveau.

On peut aussi modifier l'écoulement de sortie : si des enfants font un barrage, le niveau va monter jusqu'à ce que, l'eau passant suffisamment par dessus (ou par les trous) le débit sortant équilibre de nouveau le débit entrant.

Dans tous les cas de figure, une modification du débit entrant ou sortant a pour effet, après un certain délai, de stabiliser le lac à un niveau différent.

Il en va de notre atmosphère comme de notre lac de montagne.

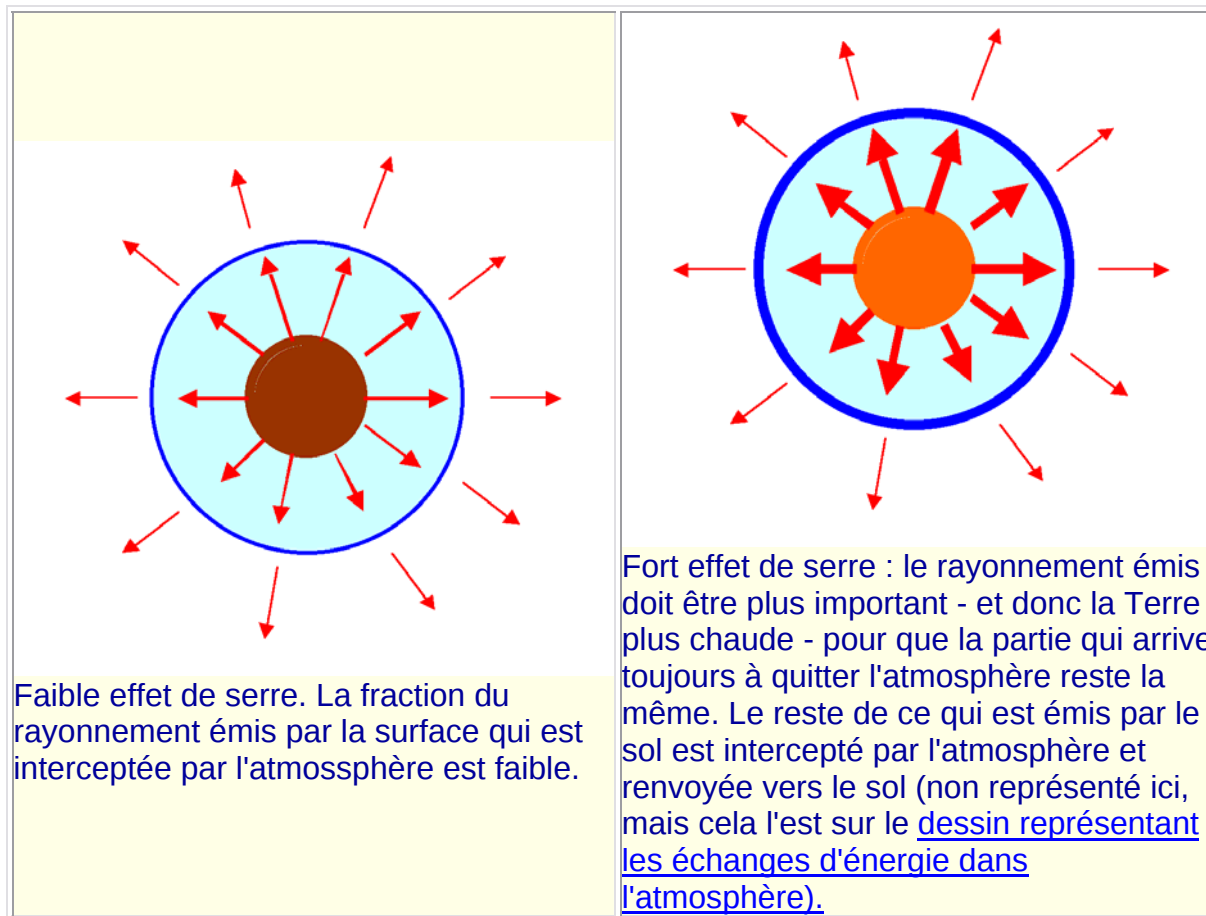
En effet, tout corps isolé dans l'espace (isolé dans l'espace veut dire "qui ne touche rien d'autre" : c'est bien le cas de notre planète !) et dont la composition ne varie pas a tendance à aller vers un état stable où il émet exactement autant de rayonnement qu'il en reçoit de l'extérieur (comme notre lac a tendance à recevoir autant d'eau qu'il en déverse).

Nous avons vu que la Terre recevait son énergie uniquement du soleil (les étoiles ne nous chauffent pas beaucoup ! Et l'énergie géothermique est parfaitement marginale au regard de l'énergie solaire ; le rapport entre les deux est de l'ordre de 1 pour 10.000). En première approximation, ce rayonnement solaire ne varie pas au cours du temps, du moins pas sur quelques siècles (en fait c'est faux, il varie très légèrement, mais ces variations sont faibles au regard de ce que nous regardons ici).

La Terre émet aussi de l'énergie, uniquement sous forme de rayonnement infrarouge (sur le même principe que les radiateurs du même nom dans certaines salles de bains).

De même que notre lac de montagne, la Terre (avec son atmosphère) a naturellement tendance à rayonner autant d'énergie sous forme d'infrarouges qu'elle reçoit d'énergie du soleil, pour équilibrer les échanges. Comme le rayonnement solaire ne varie pas, cela veut dire que les infrarouges qui quittent l'atmosphère vers l'espace ont tendance à rester à un niveau constant eux aussi.

Les activités modernes de l'homme ont pour conséquence d'augmenter la teneur de l'atmosphère en [gaz à effet de serre](#), qui ne laissent pas bien passer les infrarouges émis par la Terre. L'atmosphère devient donc plus opaque aux infrarouges, qui ont plus de mal à partir vers l'espace (c'est l'élévation du niveau du barrage dans l'analogie avec notre lac, ou l'augmentation de l'épaisseur des vitres dans l'analogie avec la serre).



L'énergie de ces infrarouges supplémentaires retenus prisonniers va chauffer le système atmosphérique et la surface terrestre. De ce fait la Terre va rayonner de plus en plus d'énergie (la quantité d'énergie rayonnée augmente avec la température : un four froid rayonne moins d'énergie qu'un four chaud, ce que tout le monde peut facilement constater !), jusqu'à ce que la partie qui arrive à quitter l'atmosphère soit devenue la même que ce qu'elle était avant l'augmentation de l'effet de serre (figure ci-dessus).

Un nouvel état d'équilibre est atteint (il met quand même [quelques siècles après modification de l'atmosphère](#)), mais dans l'intervalle la surface et l'atmosphère se sont réchauffées.

Comme nous sommes désormais en train d'[augmenter chaque jour un peu plus l'opacité de l'atmosphère aux infrarouges](#), le processus décrit ci-dessus est exactement ce qui est en train de se passer aujourd'hui. C'est pour cela que l'on dit que la planète se réchauffe.

Le réchauffement de la planète a-t-il commencé ?

dernière modification : août 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Pour savoir comment évolue une température, la première chose est....de pouvoir la mesurer. Cela semble évident, mais c'est pourtant une sérieuse limitation quand on parle d'évolution de la température moyenne au cours du temps, car une moyenne n'a de sens que si on dispose de suffisamment de points de mesure, et qu'en outre la mesure est toujours effectuée de la même manière, pour éviter les différences simplement liées au fait que l'on a changé de méthode.

Selon la période à laquelle on s'intéresse il y a différents moyens pour mesurer ou reconstituer les températures.

La mesure directe avec un thermomètre ayant une fiabilité acceptable n'est possible que depuis 1860 : les mesures directes de température ne permettent donc pas un recul supérieur à un siècle et demi. En outre, à cette époque (1850), et même pendant un certain temps après, les stations de mesure au sol étaient peu nombreuses, et l'océan, en particulier, était très mal couvert.

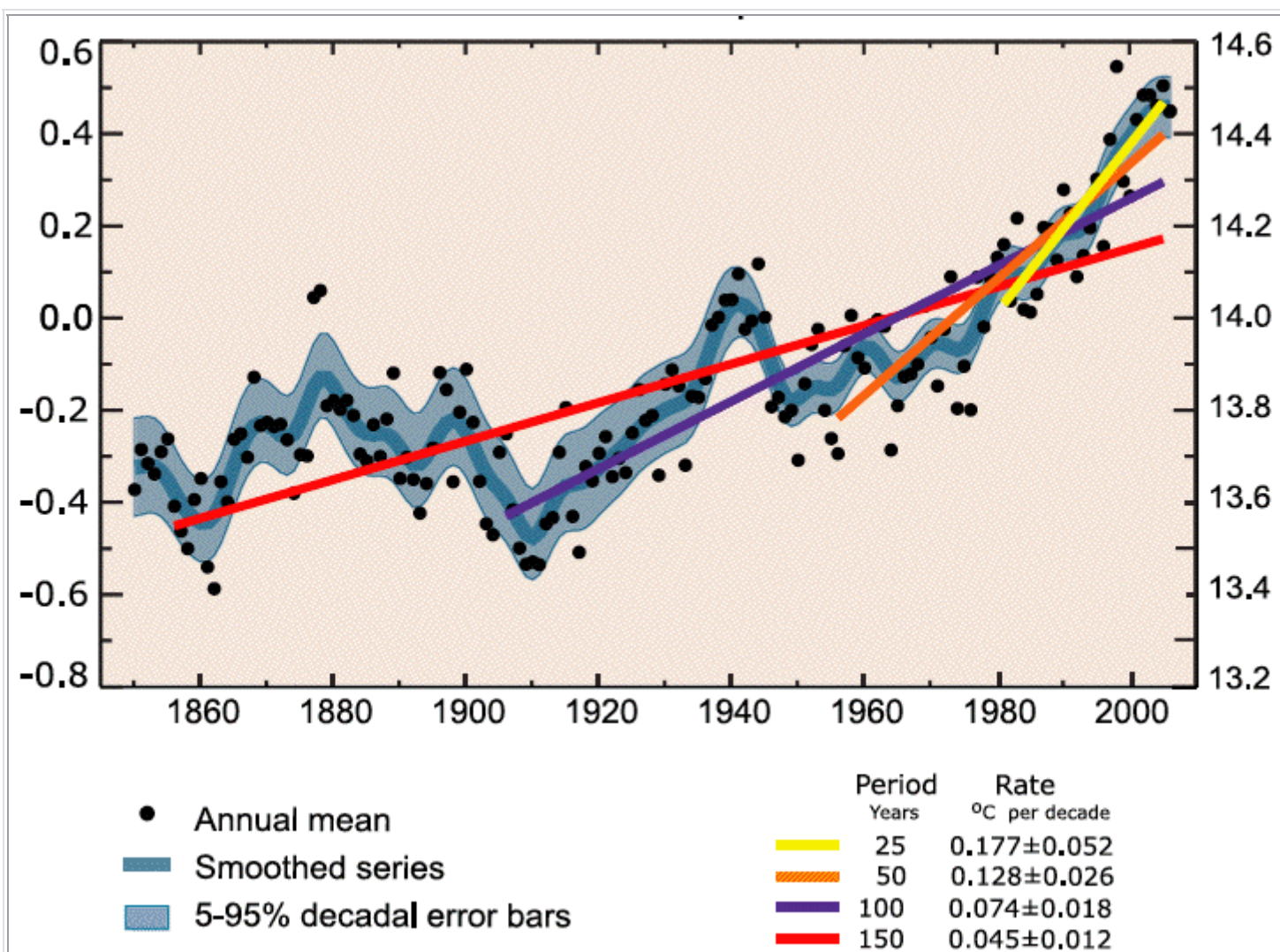
Enfin la manière de mesurer la température n'était pas nécessairement la même selon les endroits. Si l'on reprend l'exemple de l'océan, et disons que nous sommes en 1900, tel bateau pouvait mesurer la température de l'eau contenue dans un seau remonté par dessus le bord, alors que tel autre mesurait cette température dans le tuyau d'alimentation de la chaudière à vapeur : le résultat n'était pas nécessairement le même !

Il faut donc "corriger" les différentes séries disponibles, pour les rendre cohérentes les unes avec les autres. Pour reprendre l'exemple ci-dessus, si un même bateau a mesuré la température des deux manières différentes, et constaté un écart constant

selon la manière de mesurer, il est alors possible d'harmoniser les deux types de mesures, en "corrigeant" les valeurs obtenues avec la méthode 1 pour les rendre comparables avec celles effectuées avec la méthode 2.

De telles "corrections" sont aussi nécessaires lorsque l'on déplace une station de mesure au sol (par exemple en périphérie d'une ville), lorsque l'on change d'appareil de mesure, ou encore d'heure de mesure de la température dans la journée...

Si l'on reporte la moyenne de ces températures mesurées, une fois harmonisées de manière adéquate, on obtient la courbe ci-dessous, qui est déjà une première indication.



Evolution des températures moyennes de l'air au niveau du sol depuis 1850, et tendances. L'axe vertical de gauche représente l'écart à la moyenne pour la température planétaire durant la période

1961-1990 (il s'agit en fait d'une double moyenne, géographique sur la totalité de la surface planétaire, et temporelle, sur 30 ans), et l'axe de droite représente la valeur absolue de la température planétaire (qui est donc de 14,5 °C environ actuellement).

Les points noirs donnent les valeurs annuelles (ou plus exactement la meilleure estimation de la valeur annuelle), ce qui signifie par exemple que l'année 1860 a probablement été plus froide d'environ 0,35 °C que la moyenne 1961-1990, cet écart valant 0,55 °C pour 1861, etc.

La courbe bleue au centre donne la moyenne glissante de ces valeurs sur 10 ans, afin de visualiser plus facilement l'évolution, et la zone grisée qui entoure cette courbe donne la barre d'erreur (intervalle de confiance à 95%).

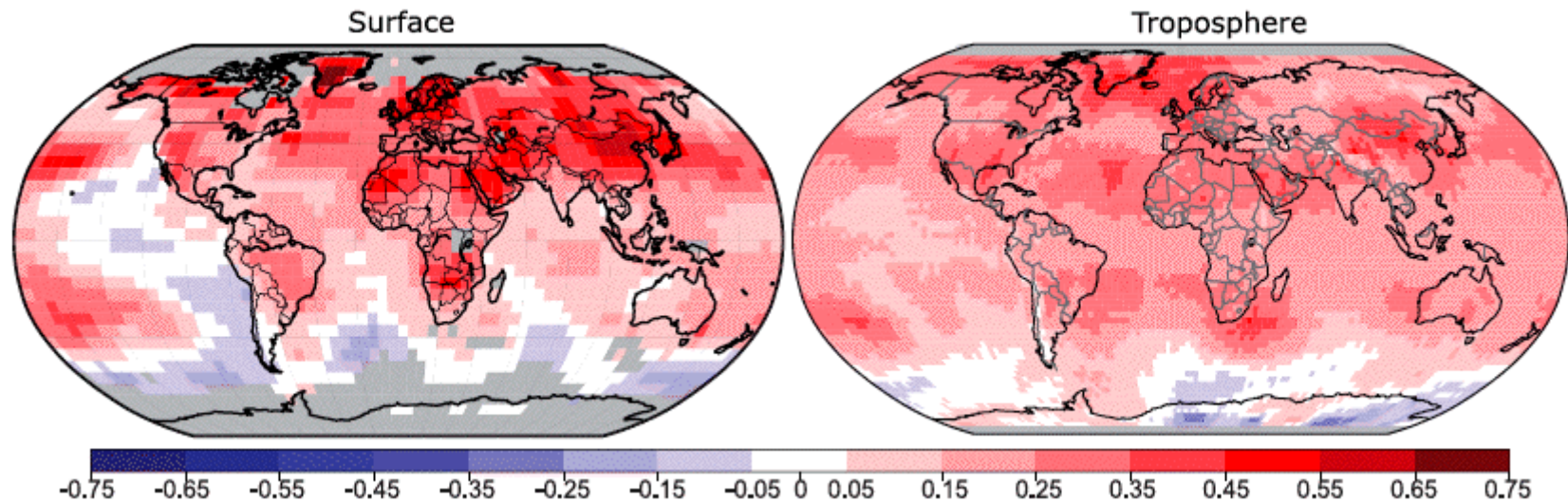
Enfin les droites de couleur donnent la tendance - linéaire - sur les durées indiquées, avec l'augmentation moyenne par décennie qui figure dans la légende. On notera que cette augmentation moyenne par décennie accélère nettement avec le temps.

La baisse et la hausse très modérée qui ont suivi 1945 sont peut-être dues à la pollution locale intense - cette dernière est un [facteur de refroidissement](#) - qui a pris place pendant les "Trente Glorieuses", période d'intense activité industrielle.

Source : [GIEC](#), 4th assessment report, 2007.

Ce sont toutefois les raisons rappelées plus haut qui expliquent que l'élévation de température, qualitativement très nette, est donnée avec une marge d'erreur pour sa valeur exacte : la température moyenne de l'air au niveau du sol est considérée comme ayant augmenté de $0,75\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ depuis le début du 20^e siècle. Cette courbe permet aussi de constater que les années les plus chaudes du XX^e siècle sont toutes très récentes.

Les observations permettent aussi de détailler la répartition régionale de cette élévation pour le dernier quart de siècle.



Augmentations moyennes de température par décennie de 1979 à 2005, en fonction de la région, pour la surface terrestre (à gauche) et l'ensemble de la troposphère, c'est-à-dire en gros les 10 premiers km de l'atmosphère à partir du sol (à droite). Les zones grisées correspondent à des endroits où il n'y a pas assez de données, en gros les pôles et les océans polaires (attention à ne pas confondre les zones grises avec les zones colorées en bleu clair !).

On retrouve (déjà ?) dans ces tendances des 25 dernières années des caractéristiques prédites pour le [changement futur](#) :

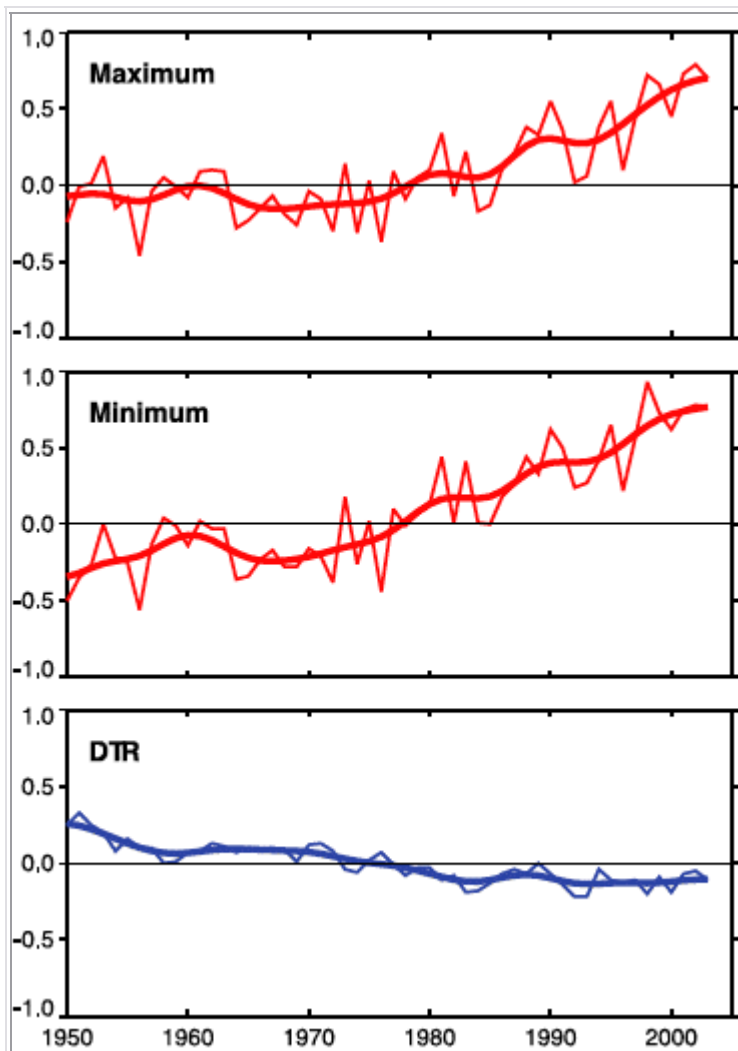
- élévation plus rapide sur les continents que sur les océans, l'inertie thermique de ces derniers étant plus importante,
- élévation plus rapide quand on gagne en latitude en partant de l'Equateur, et en particulier élévation globalement moins rapide à l'Equateur que près des pôles et élévation particulièrement marqué dans l'Arctique (du moins là où il y a des séries de disponibles),
- élévation plus rapide dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud (d'une part parce que ce dernier est plus

océanique, et d'autre part parce que la fonte de la glace de mer augmente la part du rayonnement solaire absorbé et accélère le réchauffement),

Source : [GIEC](#), 4th assessment report, 2007.

D'autres observations récentes sont aussi disponibles :

➤Exactement comme cela est [attendu pour l'avenir](#), les températures ont plus augmenté la nuit que le jour au-dessus des continents,



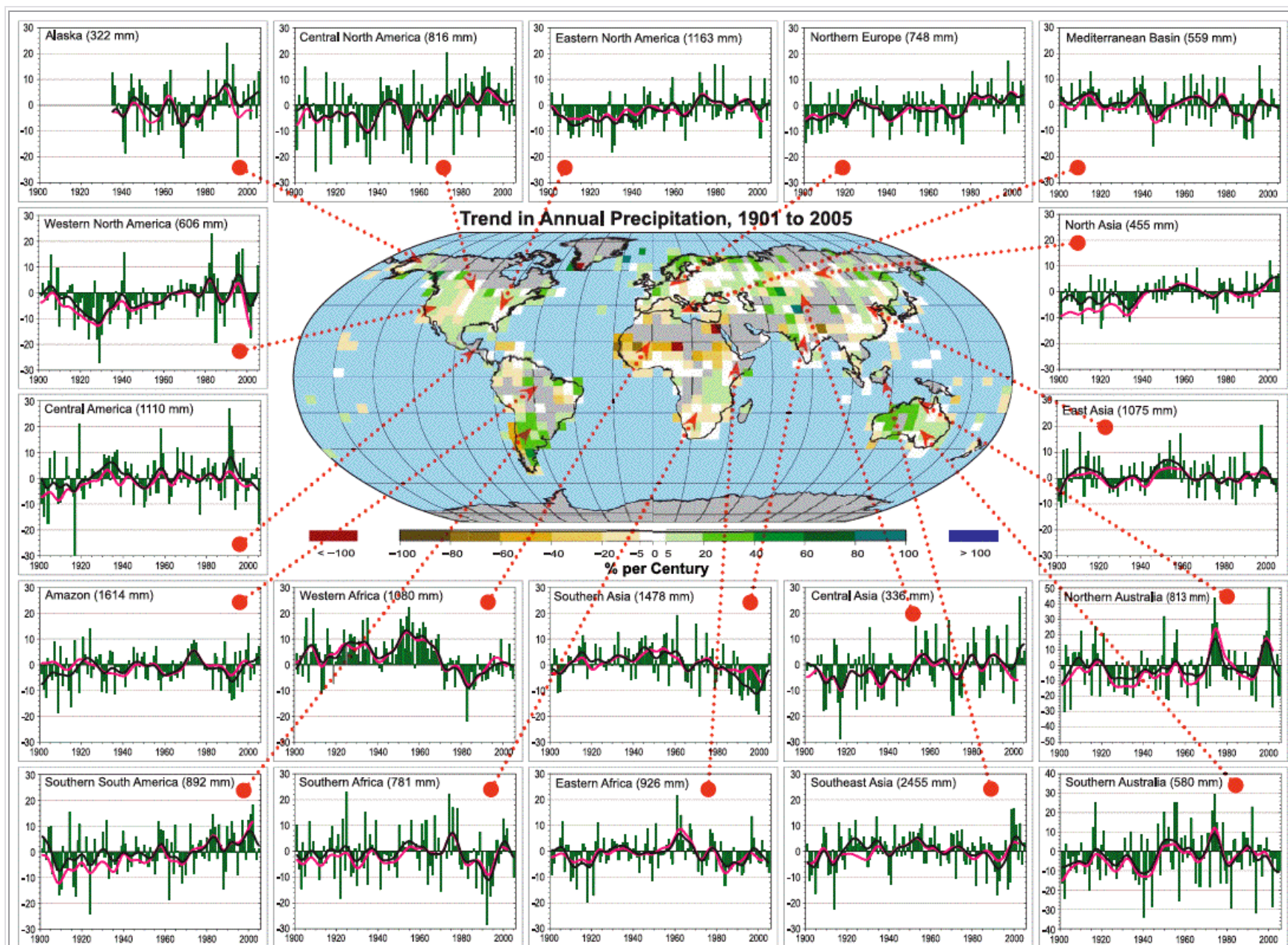
Evolution - en haut - de la moyenne du minimum journalier pour 71% des terres émergées (c'est donc la double moyenne, à la fois annuelle et géographique, des minima quotidiens) et - au milieu - de la moyenne du maximum quotidien pour la même zone (71% des terres émergées). L'axe

vertical de gauche représente l'écart à la moyenne pour la période 1961-1990.

La courbe bleue du bas représente l'évolution de l'écart journalier - là aussi en moyenne planétaire sur l'année - depuis 1950, sur ces mêmes 71% des terres émergées. L'amplitude thermique a diminué d'un petit demi-degré depuis 1950, ce qui signifie que, "en moyenne", l'écart s'est resserré entre la température la plus basse et la plus élevée de la journée un peu partout à la surface de la planète .

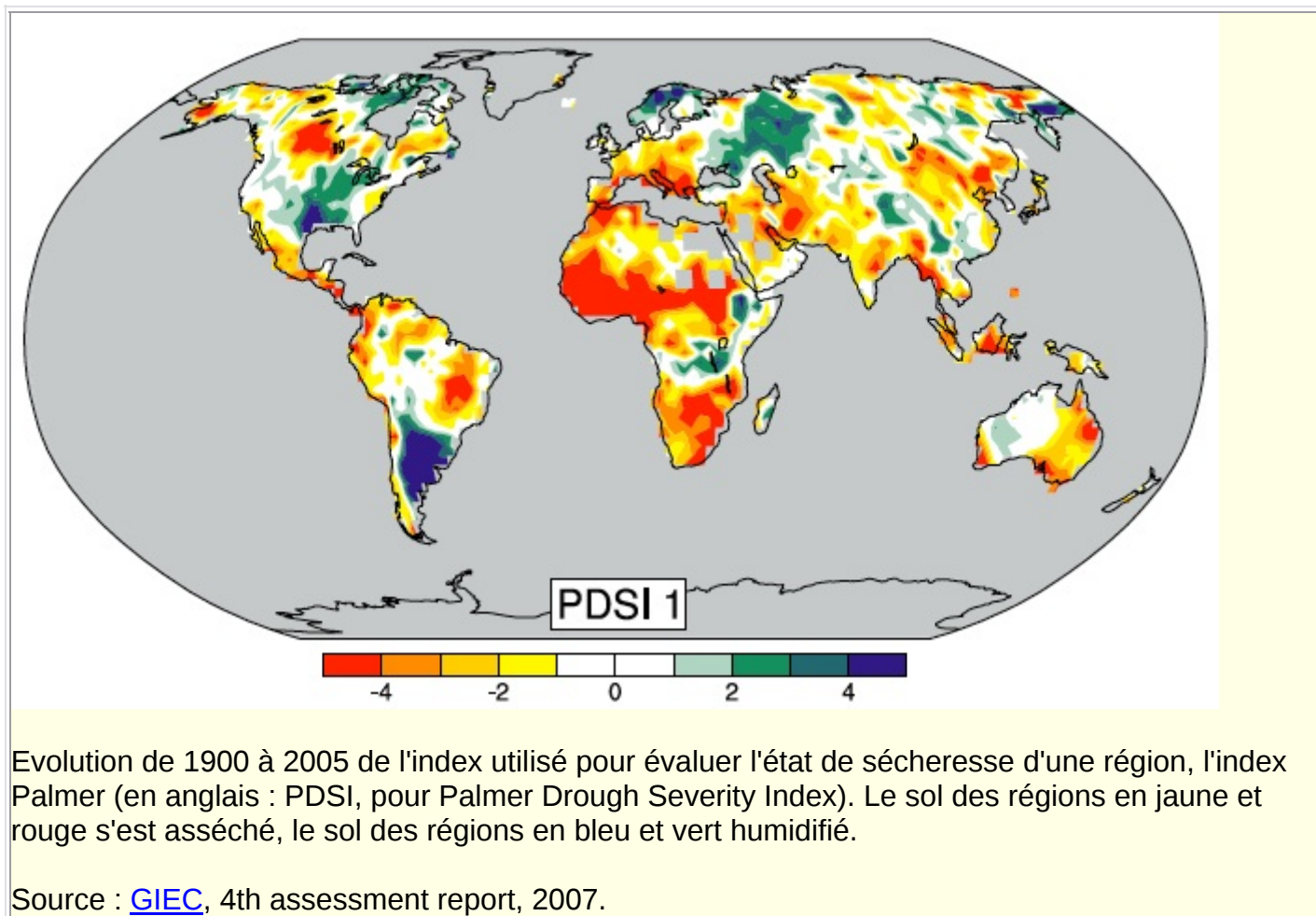
Source : [GIEC](#), 4th assessment report, 2007.

➤ Les précipitations ont varié, de manière contrastée, mais là aussi [en accord global avec ce qui est attendu pour le 21^e siècle](#),

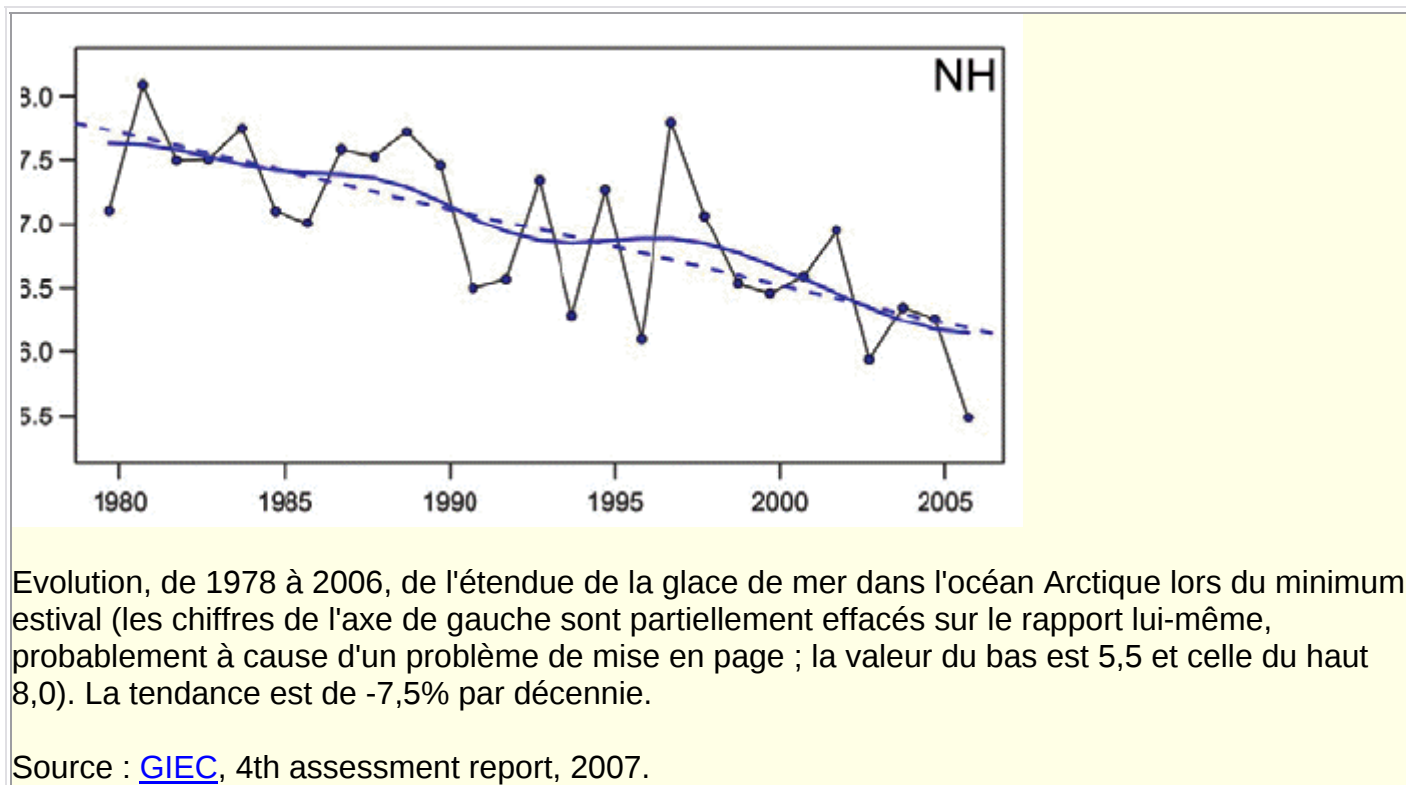


La carte centrale donne les variations sur le siècle et en pourcentage (100% signifie donc un doublement des précipitations, -100% un assèchement total) des précipitations par zone géographique. Les zones grisées correspondent à une absence de données suffisantes pour pouvoir établir une tendance.

➤Ceci entraînant cela, la sécheresse des sols a aussi varié (ce qui est un point majeur pour [l'avenir des écosystèmes](#)) :



➤La glace de mer de l'hémisphère nord a reculé en été, de manière très significative :



Et avant ?

Avant les thermomètres, on peut aussi reconstituer les températures qui régnaient à la surface de la Terre, plus loin dans le temps. Comme on ne peut pas les mesurer directement, on les déduit d'autres observations. Ces observations doivent permettre une reconstitution de la température, bien sûr, mais aussi une reconstitution de la date, ce qui est indispensable pour savoir quand la température mesurée est survenue.

Il y a 3 grandes familles de mesures pour parvenir à ce résultat, qui portent sur des époques différentes et permettent d'obtenir des résultats différents.

La première méthode fait appel aux troncs d'arbres. En analysant les cernes des troncs d'arbres (les cernes sont ce que l'on appelle aussi les "anneaux", bien visibles quand on coupe un tronc d'arbre) pour les périodes récentes (les derniers 150 ans), pour lesquels nous disposons également d'enregistrements de température et de pluviométrie fiables, les chercheurs (dont la spécialité s'appelle la dendrochronologie) se sont rendus compte que la température moyenne sur une large zone était corrélée soit à la largeur des cernes, soit à leur densité. En particulier la densité de la partie de la cerne qui pousse le plus tard en saison est assez bien corrélée à la température moyenne qu'il fait au moment du printemps et de l'été de la même année.

Les informations obtenues par cette méthode sont toutefois "perturbées" par deux effets :

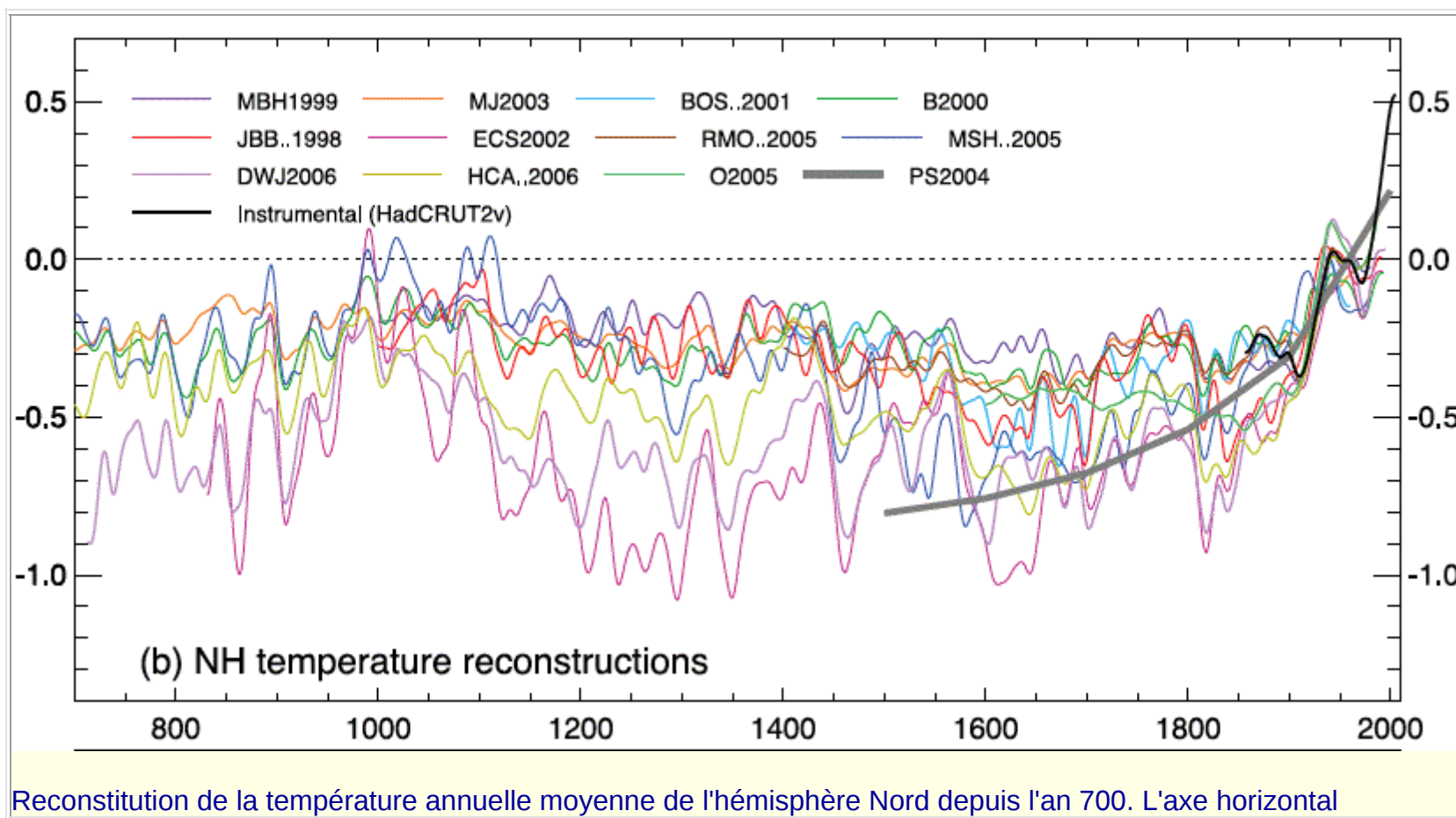
- les arbres poussent mieux jeunes que vieux, et donc les cernes vont en décroissant avec l'âge, quelles que soient les conditions climatiques par ailleurs,
- la croissance des arbres est favorisée par la [hausse de la concentration atmosphérique en CO₂](#), qui est un phénomène récent.

Il faut donc "retirer" des séries mesurées ces biais dus à l'âge de l'arbre ou à la hausse de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. On fait cela en supprimant, par un traitement mathématique approprié, l'information sur les variations lentes des séries mesurées. Mais en faisant cela, on perd aussi, en même temps, l'information sur l'évolution lente du climat, qui se produit au même rythme que la croissance de l'arbre ou l'augmentation de la concentration en CO₂. Il existe apparemment d'autres méthodes, plus récentes, qui permettent de "retrouver" les évolutions lentes du climat, mais dans tous les cas de figure ces traitements mathématiques des données brutes entachent bien sur le résultat d'une marge d'erreur plus ou moins importante.

Par contre, l'une des grandes forces de l'analyse des cernes d'arbres est qu'elle permet de dater avec précision l'année de la mesure (en comptant les cernes), et on peut le faire sur des arbres morts aussi bien que vivants, car on peut "rabouter" des troncs de différents âges en faisant correspondre les séries de cernes épaisses et minces, dont la succession se reconnaît d'un tronc à l'autre.

Cela étant, par nature même cette méthode donne surtout les variations des températures estivales et printannières, qui ne sont pas nécessairement bien représentatives des variations annuelles. C'est typiquement le cas actuellement : dans l'hémisphère Nord, les températures hivernales grimpent aujourd'hui plus vite que les températures estivales.

Différents auteurs sont néanmoins parvenus à différentes estimations de l'évolution de la température sur les 1000 dernières années, abstraction faite des décennies les plus récentes, bien sûr.



représente la date, et l'axe vertical représente l'écart de la valeur de l'année considérée avec la moyenne hémisphérique (nord) pour les années 1961 à 1990. Les différents auteurs et les dates de publication des résultats sont mentionnées en haut du graphique.

Les températures observées (qui correspondent à celles du premier graphique, en [haut de cette page](#)) sont également reportées, en noir, à partir de 1860.

On constate que les évolutions sont qualitativement convergentes et cohérentes avec ce que nous savons par ailleurs du climat à ces époques, à travers les récits historiques et les analyses des documents anciens (gravures, actes administratifs par exemple) :

➤ on retrouve la trace de l'"optimum médiéval", qui correspond à une période un peu plus chaude - et donc particulièrement propice pour l'agriculture, mais pas aussi chaude qu'aujourd'hui, et surtout à ne pas confondre avec le [réchauffement massif que nous allons peut-être connaître](#) ! - que le reste du Moyen âge, aux alentours de l'an mil (c'est en 982 que Erik Le Rouge colonise le Groenland, où l'agriculture est rendue possible par la hausse des températures). Toutefois l'élévation de température est loin d'avoir été homogène sur l'ensemble du globe ; elle semble avoir été surtout marquée sur l'Atlantique Nord et ses rives.

➤ on retrouve également la trace du "petit âge glaciaire", qui a culminé au XVII^e siècle, pendant lequel les températures se sont refroidies significativement en Europe, mais les différents auteurs ne trouvent pas le même refroidissement pour cette période (mais là aussi le débat continue pour savoir si ce refroidissement a concerné l'ensemble de la planète ; il semble bien que ce refroidissement a là aussi été particulièrement marqué sur l'Atlantique Nord).

➤ enfin la hausse depuis 1900 est bien visible, tout comme le refroidissement temporaire de l'après guerre (la seconde, pas la première !).

Source : [GIEC](#), 4th assessment report, 2007.

Cette méthode portant sur les troncs d'arbres permet difficilement de remonter très loin : les arbres les plus vieux datent d'il y a quelques milliers d'années (ce n'est déjà pas si mal : je ne suis pas sûr de vivre aussi longtemps !), et les arbres morts ont une

fâcheuse tendance à se décomposer et à ne pas attendre sagement les chercheurs dans un parfait état de conservation. Or moins on a d'échantillons, et moins la reconstitution est précise. Cette méthode est donc limitée, en pratique, à une analyse du passé proche : quelques milliers d'années.

La deuxième méthode fait appel aux coraux. En effet, tous comme les arbres ont une croissance qui dépend de la température, les coraux ont une croissance qui dépend de la température de l'eau de mer. Par ailleurs on peut dater l'échantillon mesuré soit avec des cernes, soit avec des analyses isotopiques (voir encadré).

Qu'est-ce que l'analyse isotopique ?

Ce qui caractérise chaque élément présent à la surface de la terre (le fer, le carbone, l'oxygène, l'hydrogène...), c'est le nombre de protons dans les atomes qui le composent, que l'on appelle encore numéro atomique. Par exemple l'hydrogène est fait d'atomes qui ne comportent qu'un proton, le carbone est fait d'atomes qui comportent 6 protons, jamais un de plus ni un de moins (sinon on change d'élément), etc.

D'aucuns se rappelleront peut-être du tableau de Mendéléïev, qui décrit à quel élément on a affaire selon le nombre de protons dans l'atome (le nombre de protons est aussi le nombre d'électrons, je rappelle !).

Mais chaque élément possède, en général, plusieurs isotopes. Les différents isotopes possèdent la même quantité de protons (sinon ce serait d'autres éléments !), et donc la même quantité d'électrons (ce qui fait qu'ils ont les mêmes propriétés chimiques, car la chimie ce n'est que de l'échange d'électrons), mais un nombre variable de neutrons, et donc des propriétés atomiques un peu différentes. Par exemple tout atome de carbone possède 6 protons, mais on va trouver différents isotopes qui se différencient par leur nombre de neutrons :

- le carbone 12 possède 6 protons et 6 neutrons (c'est l'isotope le plus courant),
- le carbone 13 possède 6 protons et 7 neutrons, et constitue 1,1% du carbone terrestre environ,
- le carbone 14 possède 6 protons et 8 neutrons, mais il est instable (radioactif). Il se forme dans la haute atmosphère

sous l'effet du bombardement des noyaux d'azote par le rayonnement cosmique.

Or comme la masse d'un atome augmente avec le nombre de neutrons, il est facile de déduire de ce qui précède que plus un isotope comporte de neutrons et plus il est lourd. Ce point est capital, parce que dans toute réaction physique (par exemple l'évaporation) ou chimique, la nature a tendance à favoriser les isotopes les plus légers, qui "réagissent" plus vite.

Et surtout, fait capital pour nous, ce "tri" est d'autant plus efficace que la température est basse. Ainsi, a contrario, plus la température est élevée, et plus les isotopes lourds sont présents en grande proportion à l'arrivée. Par exemple, plus il fait chaud à la surface de l'eau, et plus les isotopes lourds de l'oxygène (l'oxygène 17 et l'oxygène 18, l'isotope le plus léger - et le plus abondant - étant l'oxygène 16) sont présents en grande quantité dans la vapeur d'eau.

Ce raisonnement s'applique également à l'hydrogène, qui est le deuxième constituant de l'eau, et qui comporte 2 isotopes "naturels", l'hydrogène "normal" (juste un proton) et le deutérium (un proton et un neutron, donc 2 fois plus lourd !) : plus il fait chaud à la surface de l'eau qui s'évapore, et plus la proportion de deutérium dans la vapeur d'eau est forte.

Il existe des moyens techniques qui permettent de connaître la proportion des différents isotopes d'un élément dans un échantillon analysé. Ces méthodes s'appellent "l'analyse isotopique" et utilisent souvent un appareil qui s'appelle un spectromètre de masse.



Un spectromètre de masse (pas celui qui sert aux analyses des coraux, mais j'attends une photo décente !) . Photo prise sur le site de l'[Institut de Physique du Globe](#), Université Paris 6 Jussieu.

Par ailleurs, pour les isotopes radioactifs dont la proportion décroît avec le temps (le carbone 14 est l'exemple le plus connu, mais il y en a beaucoup d'autres) nous disposons d'une horloge, qui permet d'accéder à une donnée utile pour reconstituer les températures du passé, car moins il y a de cet isotope radioactif dans l'échantillon analysé, et plus il est vieux. Si nous avons la chance de pouvoir connaître quelle était la proportion de cet isotope dans l'échantillon analysé au moment de sa formation, nous pouvons, en mesurant la proportion restante de cet atome radioactif dans l'échantillon, en déduire son âge approximatif. Ce n'est pas sans intérêt !

L'analyse isotopique est donc d'une incomparable utilité pour l'étude des climats du passé.

Après les coraux et les troncs d'arbres, un troisième matériau qui permet d'obtenir des choses intéressantes est tout simplement la glace, notamment des calottes polaires, mais aussi des glaciers continentaux. Comme il est expliqué dans l'encadré ci-dessus, la proportion des différents isotopes de l'oxygène ou de l'hydrogène dans la glace permet de reconstituer la température qu'il faisait au moment où les précipitations de neige (qui se transformera en glace ensuite) ont eu lieu. En effet, plus il fait chaud à la surface de la terre, plus la proportion d'isotopes lourds (Oxygène 18, deutérium) dans la vapeur d'eau est importante, et donc plus cette proportion est importante dans la neige qui tombe en Antarctique ou au Groenland.

Pratiquement, on va prélever une très longue carotte dans la glace des calottes polaires, et à intervalles réguliers on va prélever un peu de glace dans cette carotte et mesurer la proportion d'isotopes lourds.

Comme l'épaisseur de glace des calottes est très importante, cette méthode permet de remonter très loin dans le temps (plusieurs centaines de milliers d'années en Antarctique), mais bute sur un problème de datation fine des échantillons, car l'âge de la glace analysée ne peut généralement se déduire que d'un modèle d'écoulement de la glace, non de mesures directes effectuées dans cette dernière.

Une quatrième méthode pour reconstituer la température qu'il a fait consiste tout simplement.... à mesurer directement la température sur toute la hauteur d'un trou de quelques centaines de mètres de profondeur creusé dans la terre (l'expression anglaise est "borehole thermometry"). En effet, la température le long du trou dépend de la température moyenne de surface qu'il a fait dans le passé, et de la vitesse de diffusion de la température de surface vers la profondeur ensuite (tout matériau conduit un peu la chaleur, et donc la température dans les premières centaines de mètres change au cours du temps, en "subissant" les variations de température de surface qui se répercutent lentement en-dessous, qui se surperposent, bien sur, aux variations de l'énergie géothermique qui fluctue un peu aussi). Avec des petits calculs appropriés (mais que je serais bien incapables de faire !) il est possible de déduire des renseignements sur l'évolution de la température moyenne de surface au-dessus du trou.

De tels "trous" ont été creusés en 600 endroits différents à la surface de la terre, mais on considère que les indications fournies cessent d'être valables si l'on remonte plus de 5 siècles en arrière, et en outre des modifications de l'occupation des sols induisent des perturbations dans les résultats. Les résultats sont toutefois qualitativement convergents avec ce que l'on trouve ailleurs.

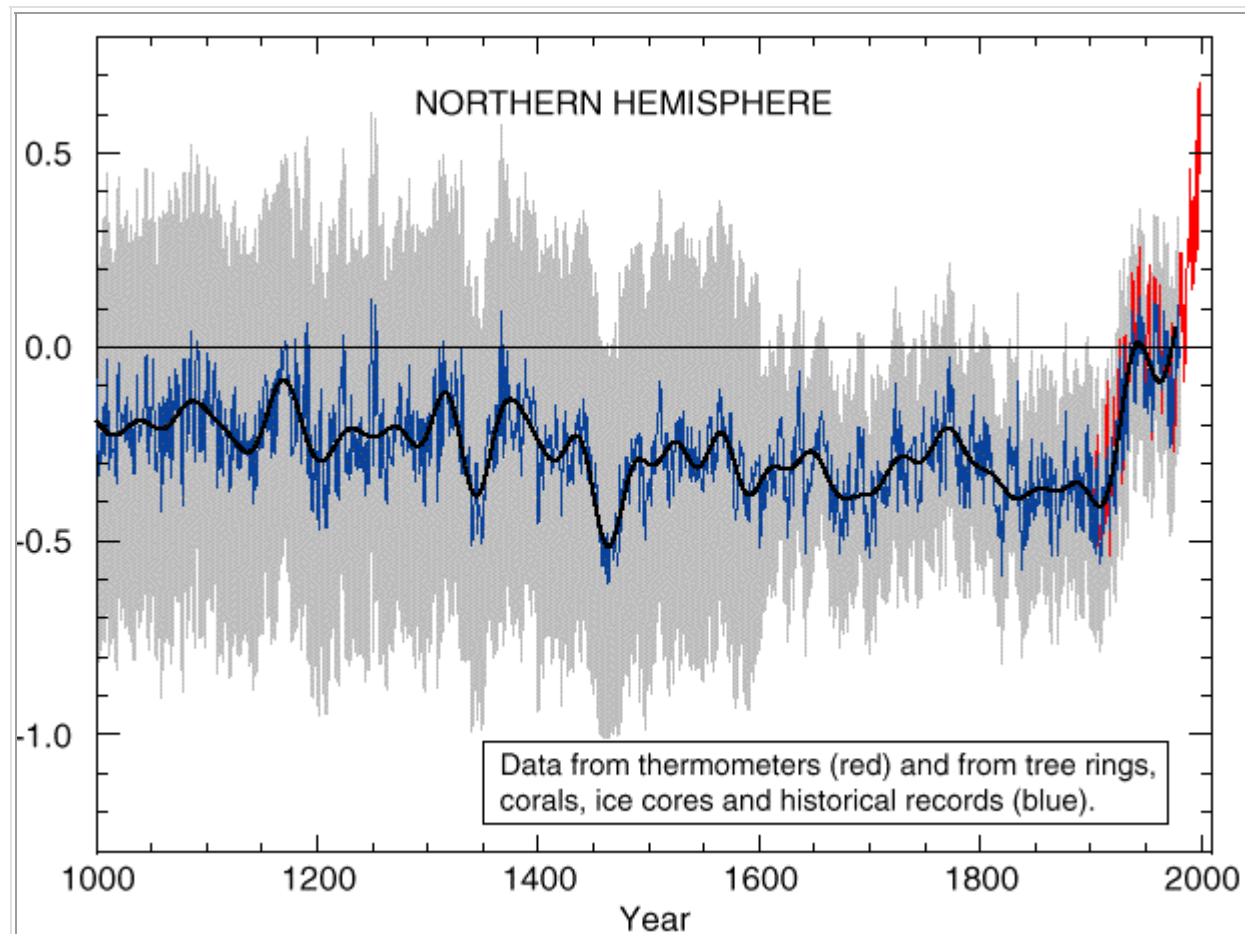
Cette méthode peut aussi être utilisée dans le trou qui se forme quand on extrait une carotte de glace du Groenland ou de l'Antarctique. La température mesurée à diverses profondeurs du trou dépend à la fois de la température de surface qu'il a fait quand la glace s'est formée puis de la manière dont cette température de surface a évolué ensuite, les modifications se répercutant lentement vers les profondeurs.

Pour des périodes encore plus anciennes, on peut également analyser les sédiments marins (voir [page sur les courants](#)). Cette méthode permet de remonter le temps sur plusieurs dizaines de millions d'années, et permet toujours de reconstituer des températures ! (voir encadré de la [page sur les courants](#)).

Bien sûr, plus on remonte loin, et plus le "pas de temps" (c'est-à-dire l'intervalle minimum qui sépare deux mesures) est important : l'analyse de sédiments marins vieux de quelques millions d'années, par exemple, ne permet pas d'obtenir autre chose que des moyennes sur un ou plusieurs millénaires. De même, l'analyse des glaces polaires ne permet généralement pas une résolution supérieure à quelques années (plus l'époque est récente et plus la précision est grande), ce qui est cependant amplement suffisant pour le propos qui nous concerne.

Et au final, que pouvons nous en déduire ?

Si nous faisons une compilation de toutes ces méthodes d'analyse, voici ce qu'a probablement donné l'évolution des températures sur l'hémisphère Nord pendant le dernier millénaire.



Evolution probable des températures sur 1000 ans. La légende en Anglais signifie : "valeurs mesurées avec des thermomètres (en rouge) ou déduites d'analyses de cernes d'arbres, de coraux, de carottes de glace et d'archives diverses (en bleu). La courbe noire est la valeur moyenne (sur l'hémisphère Nord) la plus probable, la zone grise la plage des températures "possibles" (ou encore la marge d'erreur).

Source : [Climate Change, the scientific basis, GIEC, 2001.](#)

Ce graphique illustre 2 faits importants à mon sens :

➤ l'augmentation récente est déjà nettement marquée par rapport à une tendance générale qui était stable, voire en très léger refroidissement,

➤ toutefois l'amplitude de ce réchauffement est du même ordre que l'incertitude liée aux méthodes d'estimation pour les années anciennes, ce qui fait dire à d'aucuns que l'on ne peut pas encore totalement éliminer la possibilité d'une seule variabilité "naturelle".

Sur ce deuxième point, peut-on tenter d'y voir clair ? Avant toute chose, il est indispensable de comprendre qu'il est paradoxalement plus facile de prédire que [la température va augmenter à l'avenir](#) que de garantir que notre espèce porte l'essentiel de la responsabilité pour l'élévation constatée dans le passé. Pour prendre un exemple que d'aucuns trouveront peut-être un peu simpliste, imaginons que nous entrons dans une cuisine où une casserole d'eau tiède se trouve sur le feu. L'eau peut être tiède parce que le feu l'a déjà chauffée, ou parce que quelqu'un l'a mise tiède dans la casserole, ou "un peu des deux mon général". Mais, même si personne n'est capable de déterminer précisément l'origine de la tiédeur déjà visible, on peut prédire sans se tromper que l'eau va continuer à chauffer si on la laisse sur le feu.

De même pour notre climat, il est désormais considéré comme très vraisemblable que c'est notre espèce qui est à l'origine d'une partie du réchauffement du 20^e siècle, notamment à cause de ce qui est exposé dans le paragraphe qui suit, mais à la limite cette question peut rester sans réponse précise sans que cela ne remette en cause la validité de la prédiction d'un réchauffement futur. Il y a en effet une conclusion robuste, qui est que tant que la proportion de CO₂ augmente dans l'atmosphère la [température augmentera ensuite](#). La question qui se pose pour le passé est de savoir si cette règle a déjà trouvé un début d'application significatif dans le passé ou ce n'est pas encore le cas.

Et pour finir sur ce point, si l'élévation de température passée a surtout résulté de la variabilité naturelle, c'est plutôt une mauvaise nouvelle : cela signifie que la variabilité naturelle nous pousse actuellement vers le haut, et que, **en plus**, nous allons "prendre" une élévation de température (et une modification climatique associée) liée à nos émissions de [gaz à effet de serre](#).

Pour en revenir à cette question de la responsabilité dans le réchauffement constaté, voici quels sont les éléments qui incitent à penser que nous y sommes pour quelque chose :

➤ la hausse enregistrée est relativement brutale, notamment celle depuis 1970, alors qu'aucune modification rapide des grands déterminants du climat n'a été constatée pendant cette période (voir [évolution naturelle du climat dans le passé](#)).

➤ la "structure" de ce réchauffement est particulière : la température a augmenté plus vite la nuit que le jour, plus vite l'hiver que l'été aux moyennes latitudes, et la cause qui est la plus cohérente avec ces évolutions est une augmentation de l'effet de serre. En effet, l'[effet de serre](#), qui se manifeste en permanence avec une intensité à peu près constante, est proportionnellement plus important la nuit ou l'hiver, quand l'énergie fournie par le Soleil est faible ou nulle. Une augmentation de l'activité solaire, a contrario, engendrerait des élévations de température plus marquées l'été et le jour (alors que ce n'est pas le cas), moments où nous recevons de la lumière.

➤ l'ordre de grandeur de l'élévation de température calculée avec un renforcement de l'effet de serre est le bon, alors qu'avec d'autres causes (soleil par exemple) l'amplitude calculée ne correspond pas à ce que l'on observe.

Ainsi, dès le début 2001, le rapport du [GIEC](#) expose qu'aucun des [modèles](#) climatiques actuellement utilisé ne sait reproduire la hausse des températures sur la deuxième moitié du 20^e siècle sans faire intervenir les émissions d'origine humaine de [gaz à effet de serre](#).

L'effet de serre, quel rapport avec le trou dans la couche d'ozone ?

dernière version : décembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Alors que je l'aurais pas supposée aussi fréquente au moment où j'ai commencé à me pencher sur l'avenir climatique, la confusion entre deux grands problèmes d'environnement qui se passent "au-dessus de notre tête" que sont l'augmentation de l'[effet de serre](#) et le "trou dans la couche d'ozone" est finalement assez courante, y compris chez des journalistes ou hommes politiques (j'ai des noms !).

Ces deux phénomènes ont certes des points communs, qui expliquent bien entendu cette confusion. En voici - au moins - quelques uns :

- changement climatique et destruction de l'ozone en altitude sont deux phénomènes qui résultent d'émissions humaines de certains gaz particuliers : les [gaz à effet de serre](#) dans le premier cas, les [CFC](#) dans l'autre, ces derniers, pour compliquer un peu la chose, étant aussi des gaz à effet de serre !
- il s'agit dans les deux cas d'un processus qui concerne l'atmosphère de manière globale, c'est à dire que le lieu d'émission des gaz en cause est sans importance, parce que leur durée de vie dans l'air est suffisamment longue (des décennies ou des siècles dans les deux cas) pour que le brassage rende la concentration - et donc les conséquences - homogène à peu près partout,
- autre conséquence de la longue durée de résidence de ces gaz, il s'agit dans les deux cas d'un phénomène [qui n'est pas réversible à court terme](#), à supposer, pour le changement climatique, qu'il soit réversible tout court avant la disparition de l'homme de cette planète,
- il s'agit dans les deux cas d'un problème qui a donné lieu à la signature d'un protocole international par lequel les pays s'engagent à une action : le protocole de Montréal dans le cas de l'ozone stratosphérique (mais ce protocole ne concerne en rien l'effet de serre) et le [protocole de Kyoto](#) pour le changement climatique (qui ne concerne pas les gaz destructeurs de la couche d'ozone),
- enfin la diminution de la couche d'ozone a un effet sur le climat, bien que ce ne soit pas le premier facteur responsable du changement climatique : si la "couche d'ozone" s'amenuise, moins d'ultraviolets sont interceptés dans la haute atmosphère, et donc un peu plus d'énergie solaire parvient au sol, ce qui intensifie le chauffage par le bas de l'atmosphère, et donc modifie un peu le climat.

[Les différences entre changement climatique et diminution de l'ozone stratosphérique](#)

Mais il y a bien sur des différences fondamentales entre ces deux phénomènes que sont le changement climatique et le "trou" dans la couche d'ozone :

- pour l'essentiel, les [gaz à effet de serre](#), qui causent le changement climatique, ne perturbent pas la couche d'ozone,
- le rôle joué par les gaz à effet de serre est [purement physique](#) : ils perturbent les échanges d'énergie dans l'atmosphère, mais ils n'engendrent aucune réaction chimique qui est la cause du problème.
- Au contraire, c'est le rôle chimique joué par les CFC qui est la source du problème pour l'ozone en haute altitude (même si les ultraviolets du soleil sont indispensables),
- ce ne sont pas les mêmes marge de manoeuvre qui sont disponibles pour atténuer le problème : pour l'ozone, les émissions en cause (les CFC) sont circonscrites à quelques domaines industriels (voir plus bas), alors que pour le changement climatique, c'est [l'usage de l'énergie](#), c'est à dire la sève même de nos sociétés modernes, qui est en cause,
- enfin les deux perturbations ne nous font pas courir les mêmes risques :
 - ▶ l'effet premier d'une diminution de la "couche d'ozone" est une augmentation de la quantité d'ultraviolets qui parviennent au sol. Cela peut provoquer des dommages sanitaires directs (cancers...) mais impacte également les écosystèmes, notamment en inhibant plus ou moins fortement la photosynthèse (toutefois pour avoir de graves ennuis il serait nécessaire d'avoir une diminution de la "couche d'ozone" bien supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui),
 - ▶ un effet de serre brutalement renforcé aura pour sa part comme effet premier de modifier les températures au niveau du sol, et le cycle de l'eau, avec [des risques spécifiques, potentiellement gravissimes](#).

[Les différences entre l'ozone du "pic" et l'ozone de "la couche".](#)

Pour compliquer encore un peu les choses, il y a deux endroits où l'on peut trouver des concentrations en ozone dans l'atmosphère :

- dans la haute atmosphère (dans la stratosphère, très exactement), c'est le "bon" ozone, celui qui arrête les ultra-violets,
- près du sol, c'est le "mauvais" ozone, celui des pics de pollution, qui nous brule les yeux et nous irrite la gorge.

S'agit-il du même ozone ? Absolument ! Simplement dans la haute atmosphère nous ne le respirons pas, et nous voyons donc juste son effet positif. Dans la basse atmosphère, il intercepte aussi les UV, du reste, mais là nous le respirons !

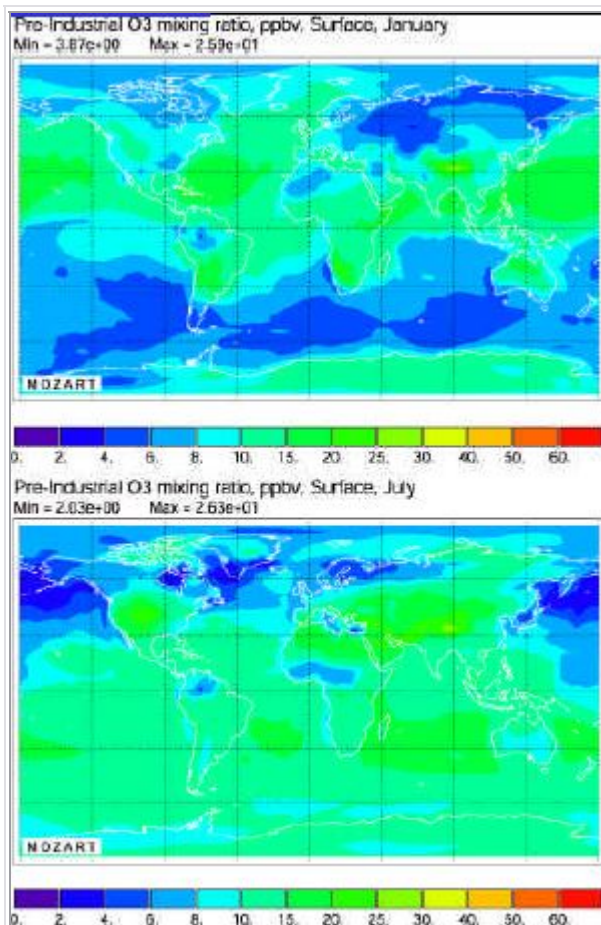
Il est aussi essentiel d'indiquer que l'ozone "du haut" et l'ozone "du bas" ne communiquent pas entre eux. Ils ont chacun leur cycles, avec des mécanismes de formation et d'élimination qui sont propres. De l'ozone formé près du sol n'ira jamais se mélanger à de l'ozone formé en altitude, et vice versa :

➤ Dans la haute atmosphère, tant la formation que l'élimination sont principalement le résultat du rayonnement ultraviolet qui agit sur l'oxygène pour créer l'ozone, et sur l'ozone pour créer de l'oxygène. Divers éléments chimiques (dont les CFC justement) peuvent déplacer la concentration d'équilibre en ozone dans un sens ou dans un autre.

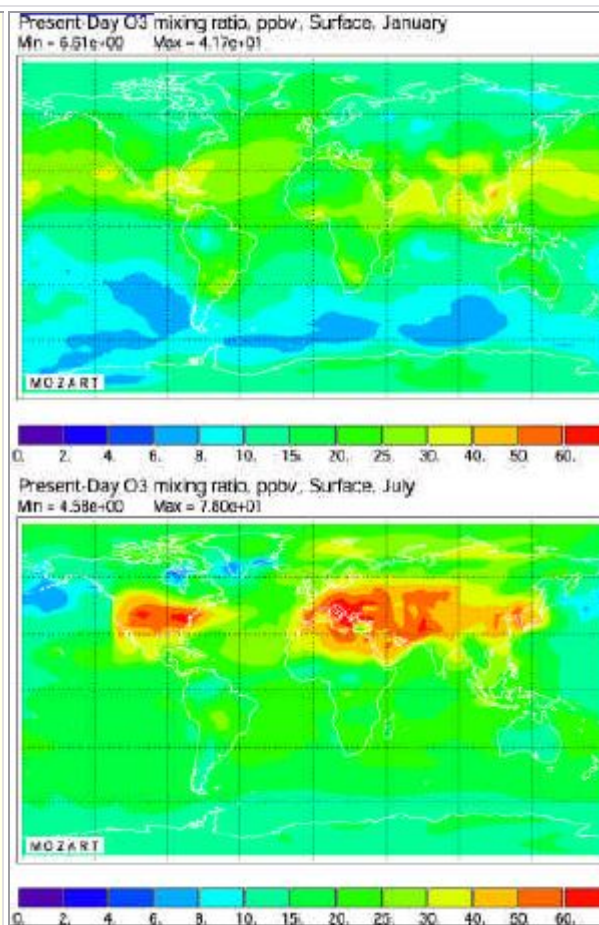
➤ Dans la basse atmosphère, la formation nécessite des "précurseurs", souvent des polluants locaux (hydrocarbures, oxydes d'azote), qui réagissent sous l'effet du soleil (il faut donc aussi un peu d'énergie sous forme de rayonnement) pour produire cet ozone. Son élimination est ensuite purement chimique (l'ozone est un oxydant plus puissant que l'oxygène et finit par oxyder "quelque chose" en perdant un atome, à la suite de quoi il redevient du simple oxygène ou se combine totalement en oxyde).

Mais pendant que l'ozone du haut diminue, celui du bas augmente !

Tout le monde sait, maintenant, que l'ozone "du haut" (celui de la stratosphère) diminue. Mais il est courant de penser que près de la surface il n'y a que les villes, l'été, qui sont concernées. Il y a assurément une telle augmentation de l'ozone au-dessus des villes en été, mais en fait l'ozone près du sol a aussi augmenté partout et tout le temps.



Concentration moyenne d'ozone près du sol, pour l'époque pré-industrielle (année 1750), reconstituée avec le modèle Mozart. La figure du dessus concerne janvier, celle du dessous juillet. Les concentrations sont données en parties par milliard en volume, notées ppbv (1 ppbv = 1 m³ par km³ = 0,0000001%).

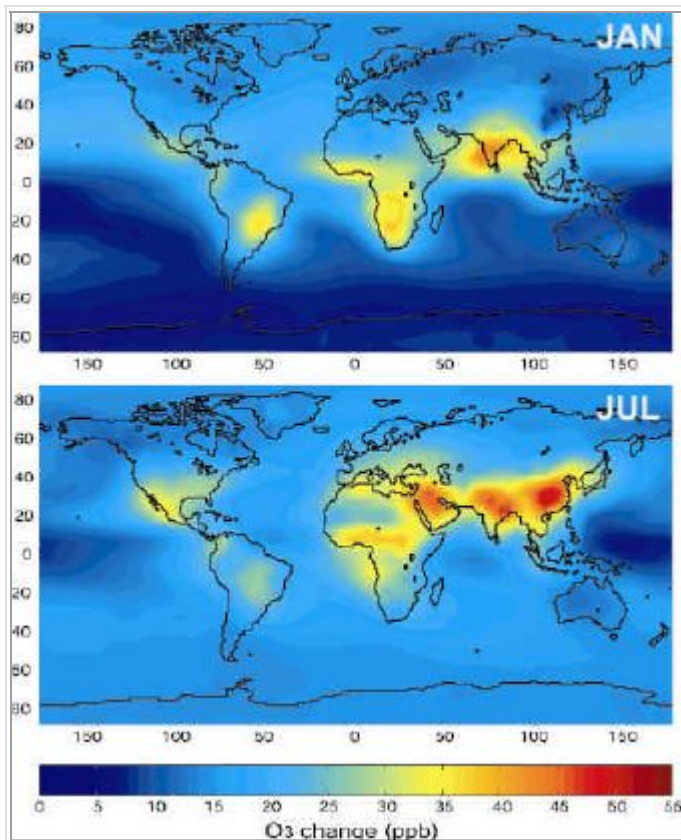


Concentration moyenne d'ozone près du sol actuellement (bien sûr le modèle donne les valeurs mesurées quand ces dernières sont disponibles). Pas un endroit de la planète n'est épargné par la hausse, quelle que soit la saison. Source : Didier Hauglustaine, conférence AFITE/LSCE d'octobre 2003 au [Laboratoire des Sciences du Climat](#)

Source : Didier Hauglustaine, conférence AFITE/LSCE d'octobre 2003 au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	et de l'Environnement
--	---------------------------------------

Est-ce que cette augmentation a quelque chose à voir avec le changement climatique ? Oui, à double titre :

➤ Comme l'ozone est un [gaz à effet de serre](#), son augmentation près du sol va augmenter l'[effet de serre](#), et cela va donc contribuer à un changement climatique accru. En première approximation, la concentration moyenne d'ozone augmente avec la consommation de combustibles fossiles, et avec la quantité de feux de forêt.

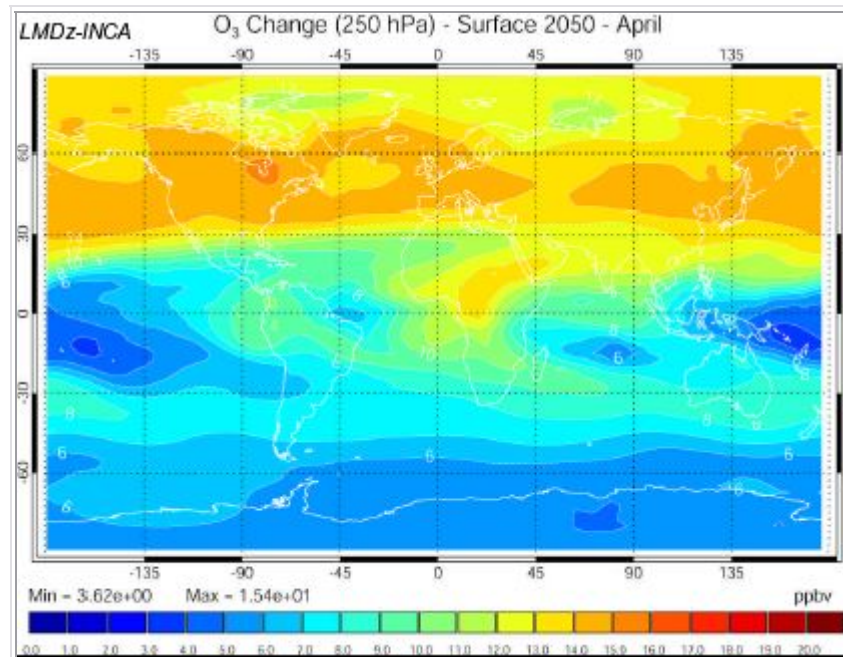


Augmentation possible de l'ozone à la surface de la Terre, en ppbv, entre 2000 et 2100, en faisant la moyenne des résultats donnés par 10 modèles différents. L'augmentation est particulièrement sensible en Asie et en Inde (accroissement de la quantité de combustibles fossiles consommés), et en Afrique (augmentation des feux de forêt).

Pour certaines régions du globe, cette augmentation conduirait à un doublement ou un triplement des valeurs actuelles.

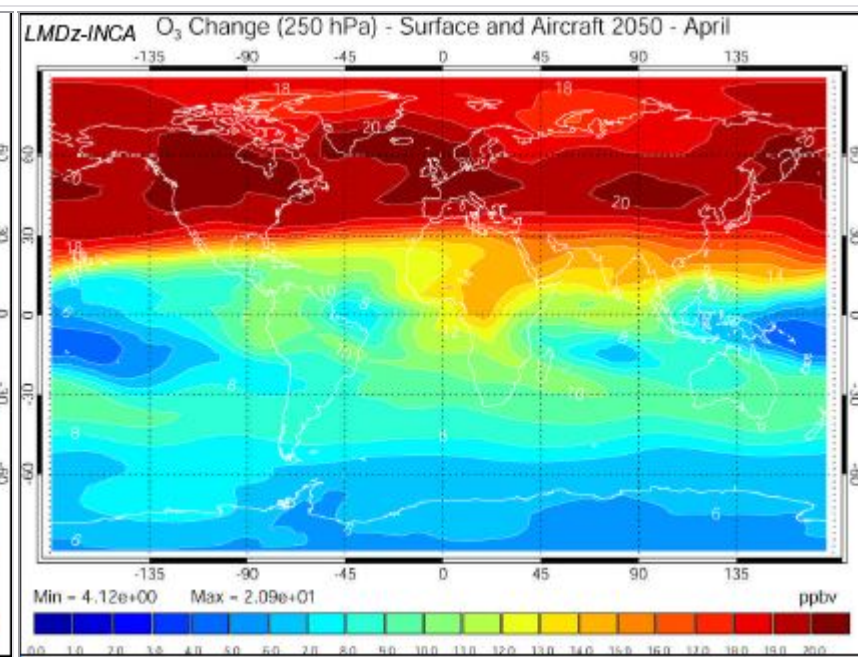
Source : Didier Hauglustaine, conférence AFITE/LSCE d'octobre 2003 au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

➤ Si nous prenons un peu d'altitude, mais sans aller jusque dans la stratosphère, l'ozone augmente aussi, surtout si l'on s'intéresse aux avions....



Augmentation de l'ozone en 2050 à 10 km du sol, avec le scénario d'émissions A2 (qui est très pessimiste, voir la [page sur les scénarios d'émission](#)), obtenue avec le modèle INCA.

Source : Didier Hauglustaine, conférence AFITE/LSCE d'octobre 2003 au [Laboratoire des Sciences du Climat et](#)



Même simulation, en incluant les émissions des avions, qui suivent le scénario Fa1 du rapport 1999 du [GIEC](#) sur les avions.

Source : Didier Hauglustaine, conférence AFITE/LSCE d'octobre 2003 au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

➤ Si nous revenons près du sol, l'ozone y a un effet désormais bien connu : c'est un inhibiteur de la croissance des plantes. Une augmentation de l'ozone près du sol pourrait (va ?) affaiblir la photosynthèse des plantes, un processus qui retire naturellement du CO₂ de l'atmosphère. **Cet effet n'est pas pris en compte** dans les [simulations](#) qui conduisent à la "fameuse" [fourchette de 1,4 à 5,8 °C d'augmentation de la température moyenne d'ici 2100](#). Lorsque cet effet sera pris en compte, on peut craindre que les prédictions gagnent en pessimisme, exactement comme cela est le cas avec la [prise en compte de l'effet d'un début de changement climatique sur le cycle du carbone](#).

Les gaz en cause dans la destruction de la "couche d'ozone" : les CFC

Le sigle CFC est une abréviation du mot "chlorofluorocarbures". Cette famille de gaz comporte de nombreux représentants, qui sont cependant tous bâtis sur le même principe : pour obtenir une molécule de chlorofluorocarbure, on prend une molécule d'hydrocarbure (le méthane, c'est à dire le gaz naturel de nos cuisinières, le propane, le butane, ou encore l'octane, que l'on trouve dans l'essence, sont des [hydrocarbures](#)) et on y remplace en totalité l'hydrogène par une combinaison de chlore (d'où le radical "chloro" dans le mot **chloro**fluorocarbure) et de fluor (d'où le radical "fluoro" dans le mot chloro**fluoro**carbure).

La formule générale d'une molécule de ce gaz est donc $C_xCl_yF_z$: elle contient seulement du carbone, du chlore, du fluor.

Les CFC sont à la fois des [gaz à effet de serre](#) très puissants (ils [interceptent efficacement les infrarouges](#) émis par la surface de la terre, et ont une durée de vie dans l'atmosphère de plusieurs siècles), et surtout des précurseurs de la destruction de l'ozone stratosphérique. C'est ce deuxième effet qui a justifié l'interdiction progressive de leur production.

Pourquoi les a-t-on utilisés, alors ? Bien évidemment, au moment de leur essor, leur effet sur l'ozone en haute altitude n'était pas connu ! Leur succès vient de ce que ce sont des molécules très stables (bien plus que les hydrocarbures), ce qui veut dire qu'elles

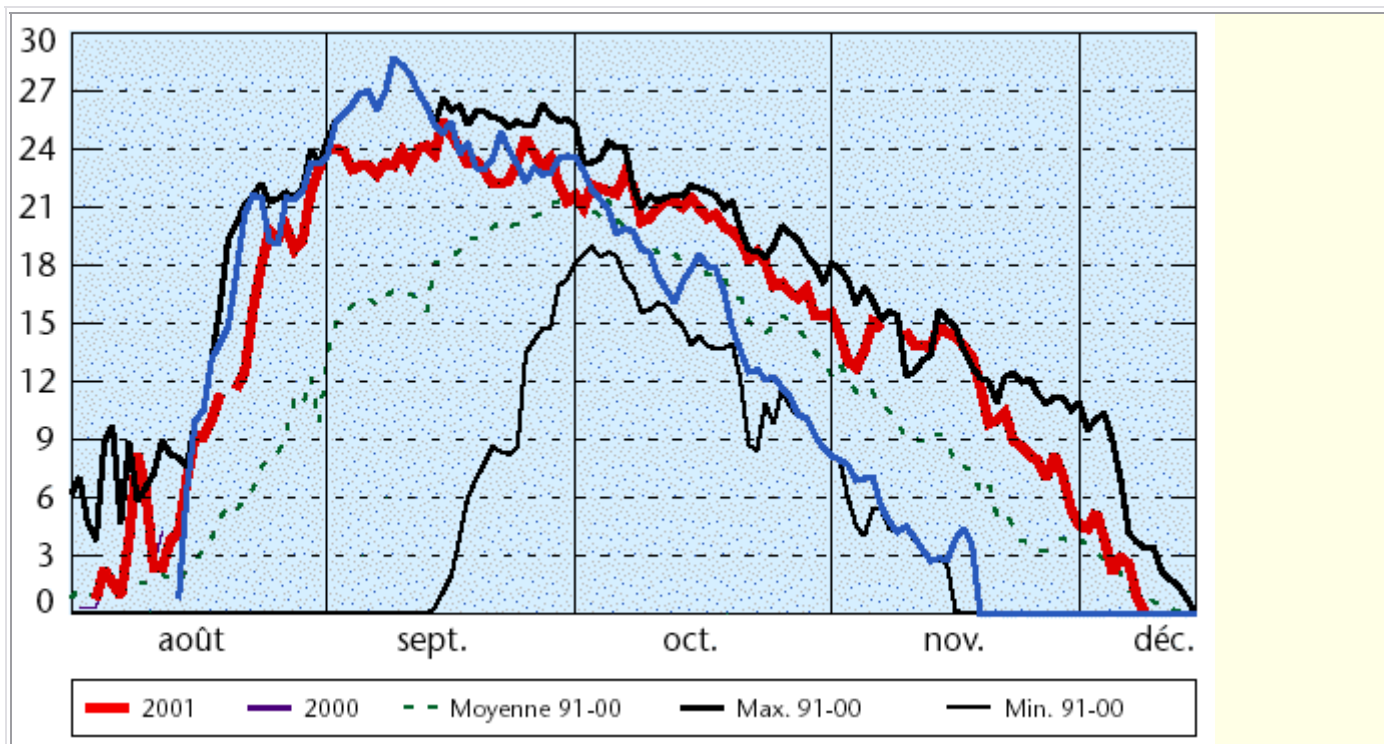
n'ont aucune toxicité chimique pour l'homme. Par opposition un polluant classique est précisément un composé chimiquement actif, susceptible de réagir avec un grand nombre d'autres composés, et donc d'avoir des effets indésirables chez des êtres vivants qui l'inhaleraient, en avaleraient ou en toucheraient par inadvertance.

Un composé qui ne réagit avec rien ou presque, si nous en avalons ou en respirons, cela a toutes les chances d'être parfaitement inoffensif. Les CFC ont donc, souvent, remplacé des gaz qui présentaient des inconvénients sanitaires ou sécuritaires dans des applications industrielles diverses :

- ils ont remplacé l'ammoniac comme fluide réfrigérant,
- ils ont servi de gaz expanseurs pour faire des mousses plastiques (par exemple le polystyrène expansé),
- ils ont servi de solvants dans l'industrie électronique,
- comme ils ne sont pas inflammables, ils ont servi pour remplacer des hydrocarbures comme gaz propulseurs dans les bombes aérosol, ou ont servi à remplir des extincteurs,
- etc...

Mais c'est bien parce que ces molécules sont difficiles à "détruire" qu'elles ont posé le problème d'environnement désigné sous le terme "trou dans la couche d'ozone" : ne réagissant pas une fois dans l'atmosphère, elles y séjournent suffisamment longtemps pour avoir le temps de diffuser jusque dans la stratosphère (ce qui prend longtemps parce qu'il s'agit de molécules lourdes), où elles sont "cassées" par les ultraviolets les plus durs envoyés par le soleil (on parle de photodissociation), et le chlore qu'elles contiennent est alors libéré et intervient dans des réactions complexes aboutissant à la destruction de l'ozone présent à haute altitude.

Cette destruction se manifeste notamment de manière très spectaculaire au moment du printemps dans l'hémisphère Sud, avec à ce moment là une disparition très rapide (en quelques semaines) de la quasi-totalité de l'ozone stratosphérique situé au-dessus de l'Antarctique.



Evolution au quotidien de l'étendue du "trou dans la couche d'ozone" au-dessus du pôle Sud, en millions de km², pour diverses années. A titre de comparaison, on se souviendra que l'Amérique du Nord a une superficie de 25 millions de km².

Le "trou" se définit comme l'étendue pour laquelle la concentration d'ozone est au plus de la moitié de la valeur normale (pour ceux qui aiment les détails, la valeur normale pour l'ozone stratosphérique est de 400 unités Dobson environ, et le "trou" concerne toute la zone pour laquelle cette valeur est de moins de 220 unités Dobson).

Il est facile de constater que la dégradation ne diminue pas particulièrement pour le moment :

l'extension pour les années 2000 (en bleu) et 2001 (en rouge) est proche du maximum (en noir).

Source : [Organisation météorologique mondiale](#) N° 940, citant le Climate Prediction Data Center de la NOAA, 2002.

En savoir encore plus sur le phénomène (pour lecteur averti) : [Ozone, l'équilibre rompu](#), de Gérard Mégie

Variation du climat et augmentation de l'effet de serre due à l'homme, c'est pareil ?

dernière version : janvier 2009

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Dans le débat qui prend place autour de l'influence de l'homme sur le climat, il y a deux affirmations qui sont assez souvent faites, bien qu'elles soient inexactes :

- dire que l'homme est devenu la seule cause de changement du climat,
- dire que la seule action de l'homme sur le climat concerne l'augmentation de l'effet de serre.

Bien sûr, dire que ces affirmations sont inexactes ne signifie en rien que l'augmentation de l'effet de serre sous notre influence est une petite affaire, qu'elle n'a pas plus d'importance que nos autres actions sur le climat, ou encore qu'elle est négligeable devant les causes de variabilité naturelle.

Il n'en reste pas moins que l'homme peut agir sur le climat de bien des manières, tout comme le climat a toujours eu des facteurs de variation naturelle qui ne doivent rien à l'homme. Cette dernière affirmation est du reste tellement vraie que, en ce qui concerne le changement climatique, la question posée à la [communauté scientifique](#) n'est pas (et n'a jamais été) "l'homme est-il responsable du changement climatique" (lequel, pour commencer ? Celui d'il y a 20.000 ans, ou celui qui pourrait prendre place entre 2000 et 2100 ?) mais "notre espèce est-elle en train de devenir le facteur dominant de variation du climat à l'échelle du siècle, et si oui, où cela peut-il nous mener ?".

Si la question est de savoir si nous sommes en train de devenir le facteur dominant, c'est qu'il y en a d'autres, CQFD ! Pouvons tenter d'y voir plus clair ?

Le climat varie-t-il sans hommes pour le tripoter ?

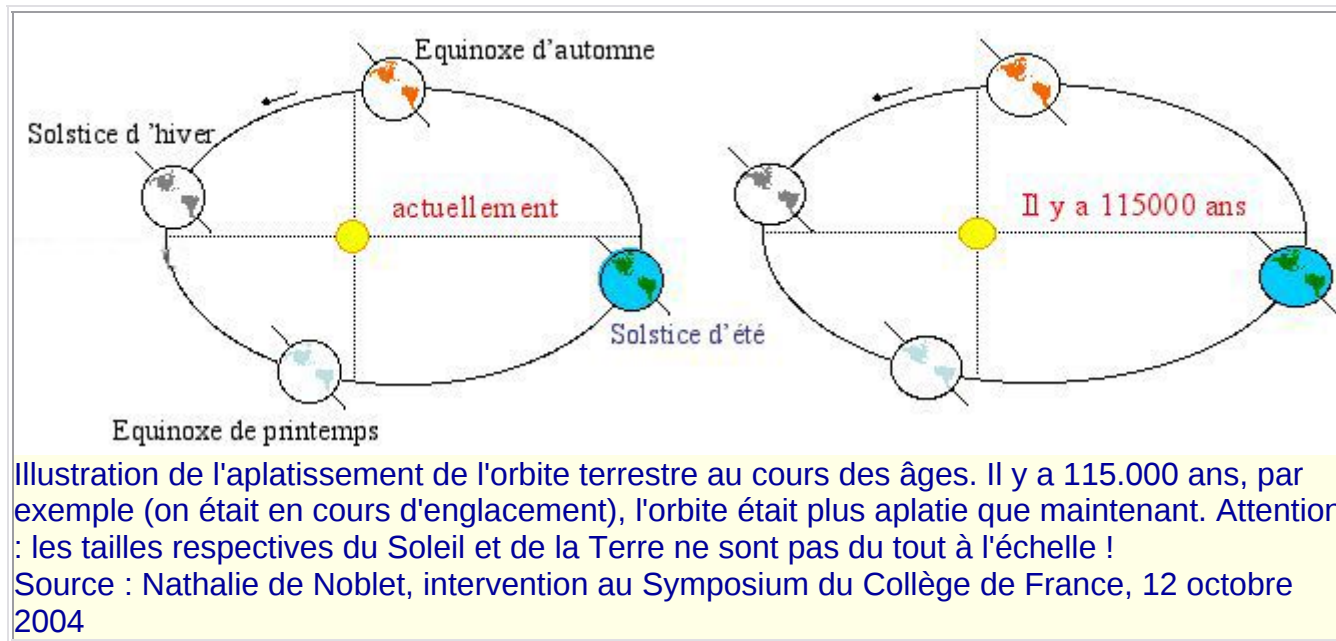
En fait, non seulement le climat est capable de varier sans hommes pour le tripoter, mais sur de longues échelles de temps il n'a jamais cessé de le faire. Il y a bien des facteurs qui influent sur le système climatique terrestre, et si, par les temps qui courent, l'homme est devenu prépondérant, la liste des éléments qui jouent un rôle est longue :

➤ le climat peut varier parce que la quantité d'énergie que le Soleil envoie sur la Terre varie. Cela même peut avoir plusieurs origines :

➤ l'énergie fournie par la machine solaire peut varier. Il y a quelques milliards d'années, par exemple, cette énergie était de 30% inférieure à l'actuelle, car le Soleil était plus jeune. Aujourd'hui aussi l'énergie que nous envoie le Soleil varie en permanence. Il y a par exemple un cycle de 11 ans, caractérisé par la variation du nombre de taches solaires, au cours duquel l'énergie solaire augmente et diminue un peu. Toutefois cette variation est faible, et n'explique pas le [réchauffement récent](#)

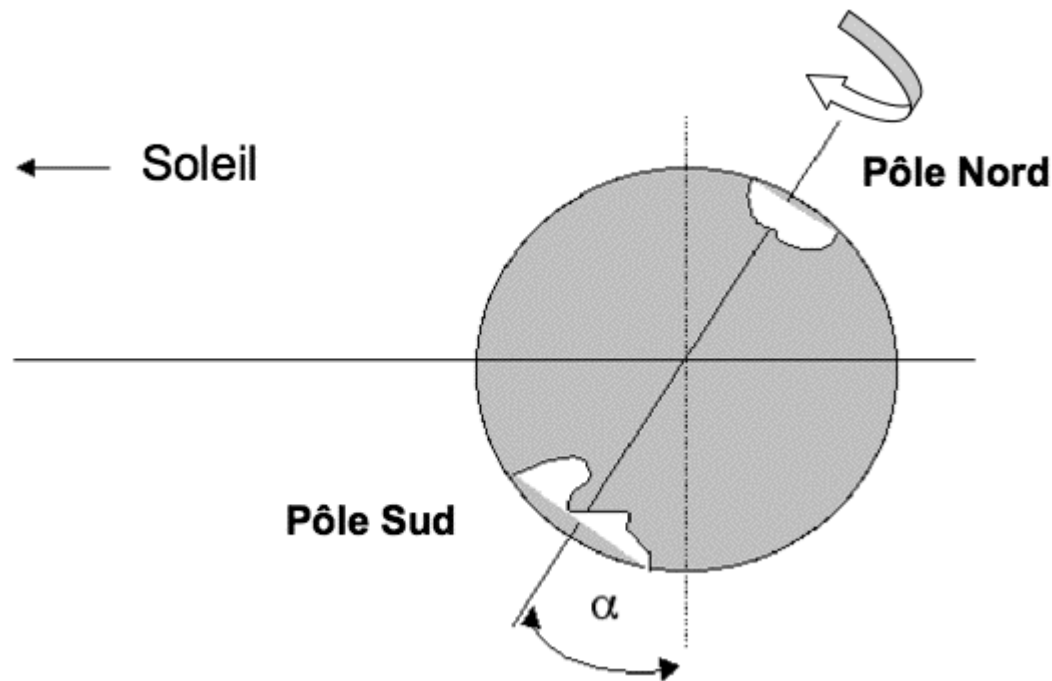
➤ sous l'influence de l'attraction des grosses planètes du système solaire, l'orbite de la Terre, qui n'est pas circulaire, se déforme un peu au cours du temps. Cela change la quantité d'énergie reçue du Soleil, ainsi que sa répartition sur la Terre. Sur le dernier million d'années, par exemple, ce sont les variations des paramètres astronomiques de la Terre qui ont engendré les glaciations et déglaciations de la planète.

Tout d'abord, "l'aplatissement" de l'ellipse que suit la terre autour du soleil varie au cours des millénaires, avec une quasi-période de l'ordre de 80.000 ans (c'est-à-dire que au bout de 80.000 ans on est dans une situation qui ressemble à un "retour à la case départ" pour ce paramètre).



Or l'énergie moyenne reçue dépend de cet aplatissement, c'est M. Kepler qui l'a dit !

Ensuite l'inclinaison de la terre sur son orbite - que l'on appelle encore l'obliquité, voir dessin ci-dessous - varie aussi, avec une période de 40.000 ans environ.

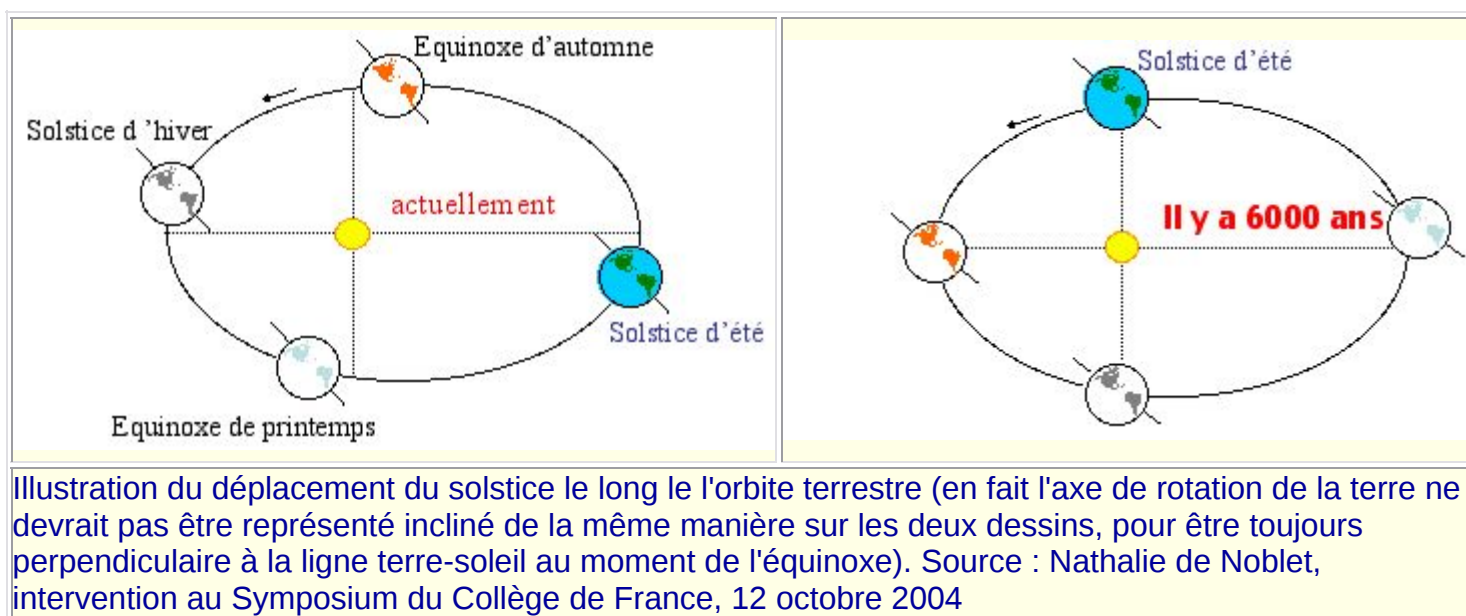


L'obliquité correspond à l'angle alpha en bas du dessin. Cet angle, d'environ 23° , varie lentement de plus ou moins 1° autour de cette valeur médiane (ca se promène donc entre 22° et 24° , en gros).

Cette variation change le contraste entre les saisons : plus cet angle est important, et plus la quantité d'énergie reçue par la terre est différente entre hiver et été. Une obliquité importante fait donc des hivers plus froids et des étés plus chauds.

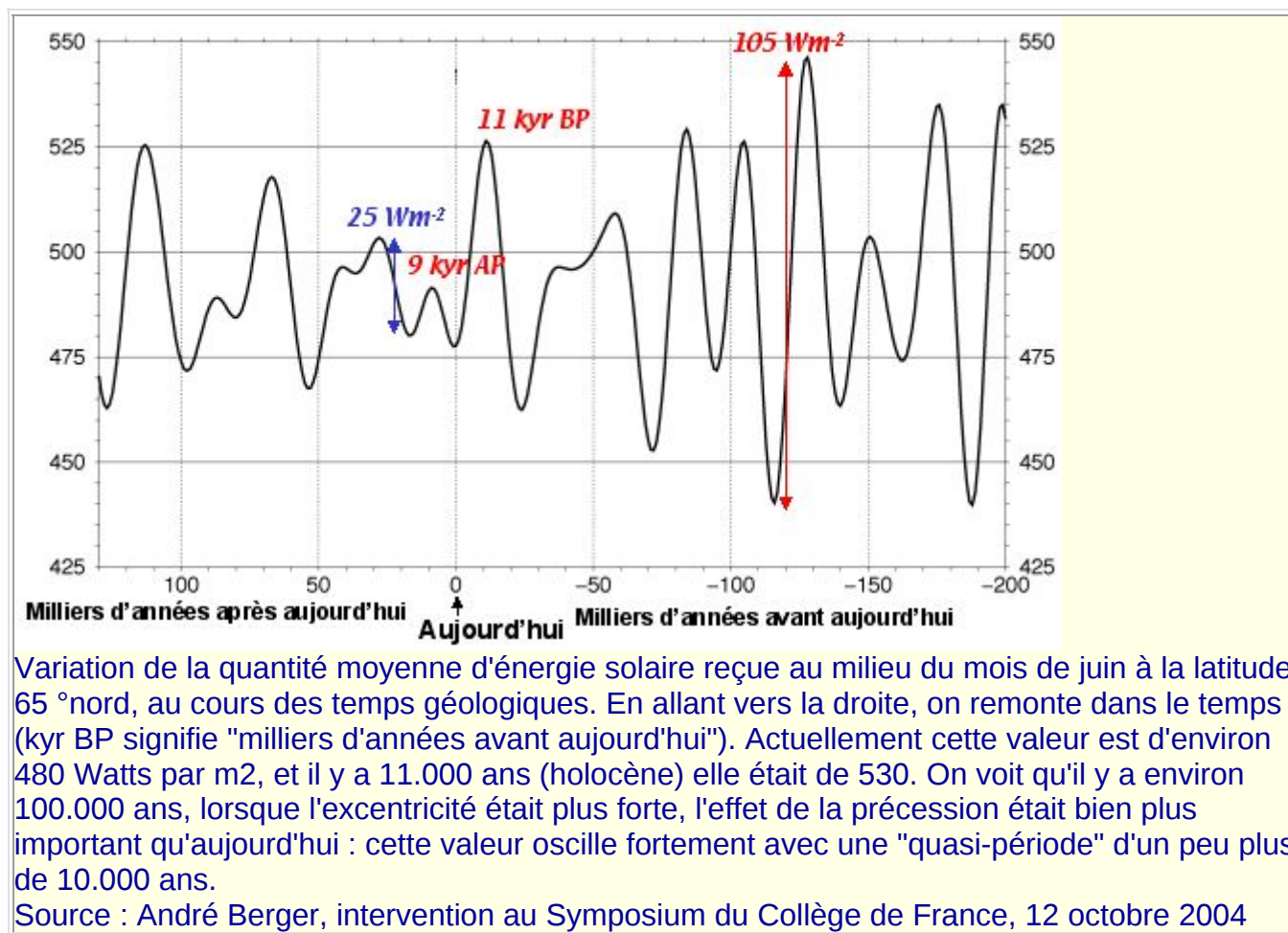
Source du dessin : Jancovici, 2002

Enfin la terre ne présente pas toujours le même hémisphère quand elle est au plus près du Soleil, ou dit autrement elle n'est pas toujours au même endroit de l'orbite au moment des équinoxes (bien que cela ne soit pas fidèlement représenté ci-dessous, l'équinoxe est le moment où l'axe de rotation de la terre est perpendiculaire à une ligne imaginaire qui joint le soleil et la terre, et à ce moment précis la longueur du jour et celle de la nuit sont exactement les mêmes partout sur terre).

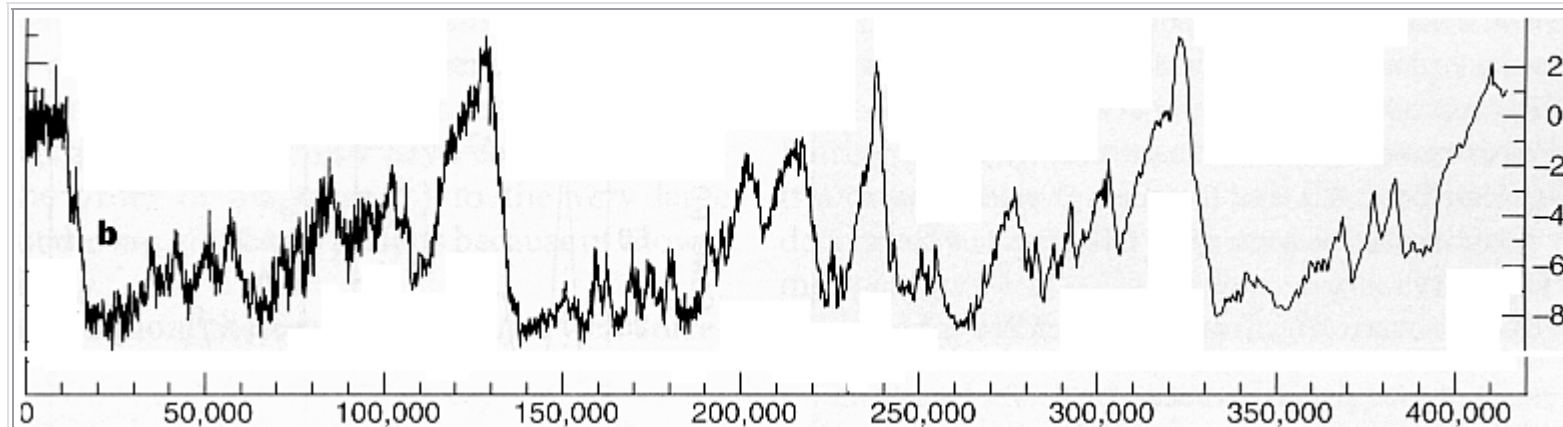


A cause de ce "cheminement" des moments où ont lieu les solstices et les équinoxes le long de l'orbite terrestre, tous les 13.000 ans il y a inversion de l'hémisphère présenté au soleil quand la Terre en est au plus près. Ce processus porte le nom compliqué de "précession des équinoxes". Il joue un rôle important, parce que les deux hémisphères (Nord et Sud) sont très différents : l'hémisphère Nord contient plus de terres, qui réfléchissent mieux la lumière que l'océan. Aussi, en fonction de l'hémisphère qui est présenté au soleil lorsque la distance est minimale, l'énergie absorbée en moyenne par notre planète sur l'année varie beaucoup.

En pratique, c'est ce dernier effet qui engendre les variations les plus rapides de l'énergie solaire que nous gardons sur Terre, cette énergie conservée mettant en route la machinerie climatique ; cet effet est toutefois plus ou moins amplifié selon ce qui se passe pour les autres paramètres astronomiques de la Terre.



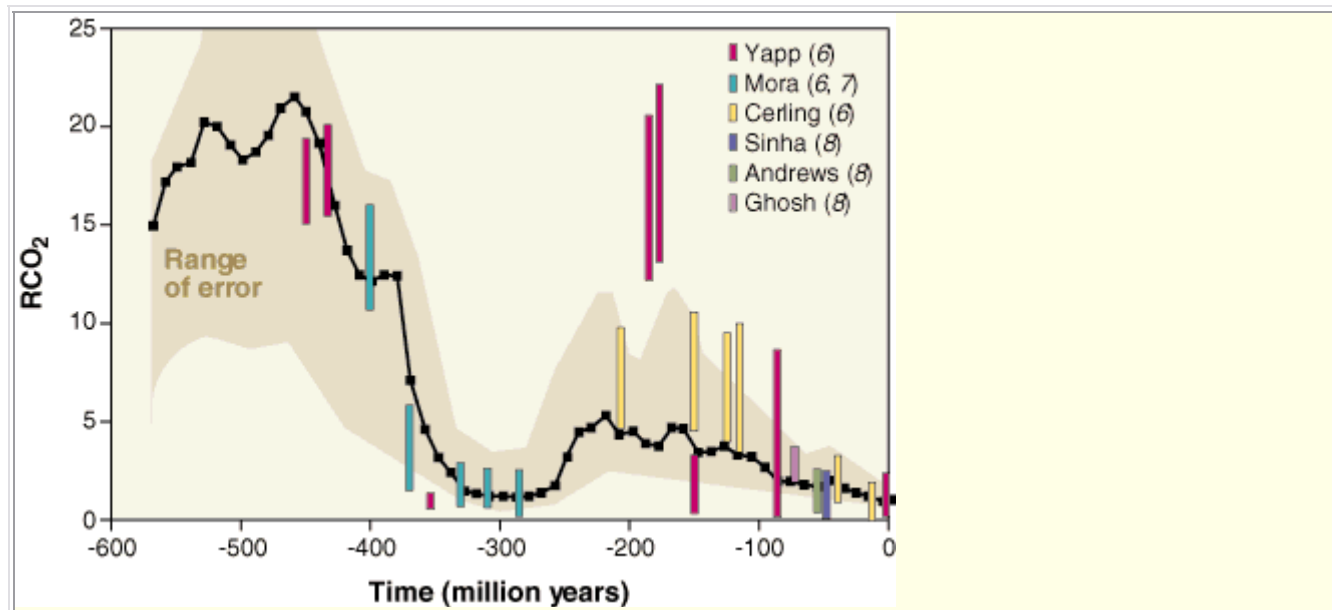
Ces diverses variations astronomiques, qui se répercutent plus ou moins vite sur le climat terrestre, ont engendré le cycle des glaciations sur les dernières centaines de milliers d'années.



Evolution, sur les 400.000 dernières années, de la température moyenne de Antarctique. Le 0 de l'axe vertical de droite correspond à la valeur actuelle (cette courbe montre donc les écarts à la valeur actuelle). Cette variation de température est légèrement plus élevée que celle de la planète dans son ensemble. Source : Petit & al., Nature, Juin 1999

Attention ! cette courbe se lit à l'envers : plus on va vers la droite, plus on remonte dans le temps. Le fait que les oscillations soient plus importantes à gauche (donc récemment) tient à la meilleure précision des mesures quand on se rapproche de l'époque contemporaine.

➤ le climat peut varier par suite d'une modification de la composition de l'atmosphère (sans intervention de l'homme), ce qui peut changer l'effet de serre. Par exemple, l'apparition de la vie a fait considérablement baisser, en quelques centaines de millions d'années, la teneur en gaz carbonique dans l'air (le CO_2 était l'un des constituants majoritaires de l'atmosphère primitive), ce qui a graduellement diminué l'effet de serre au cours de cette période (il se trouve que parallèlement l'activité solaire a augmenté, et que les deux processus se sont à peu près compensés).



Concentrations de CO₂ au cours des âges géologiques récents. RCO₂ est le rapport entre la concentration pré-industrielle en CO₂ (qui faisait un peu moins de 300 parties par million, soit 0,03% de l'atmosphère en volume) et celle existant dans le passé. Par exemple R = 5 signifie que la concentration est alors de 5*300 = 1500 ppm, ou encore que le CO₂ occupe alors 0,15% de l'atmosphère.

A l'époque des dinosaures (-230 millions d'années à - 65 millions d'années) l'atmosphère avait de 2 à 5 fois plus de CO₂ qu'à l'époque pré-industrielle, et donc l'effet de serre était plus important (mais l'activité solaire était plus faible, de telle sorte que la température moyenne de la planète n'était pas considérablement au-dessus de l'actuelle). Et surtout cette courbe ne dit pas ce qui se passe quand le CO₂ est multiplié par 2 à 4 en un siècle, ce qui n'est jamais arrivé naturellement !

Source : Berner, Science, 1997, repris sur [Planète Terre](#)

➤ le climat peut varier en fonction de l'activité volcanique. Une éruption volcanique envoie dans l'atmosphère du SO₂ (qui est un "refroidisseur du climat", voir [page sur les aérosols](#)), peut y mettre du CO₂, qui est un [gaz à effet de serre](#), et si l'éruption est assez

violente elle peut envoyer dans la stratosphère (une couche de l'atmosphère qui débute à 10 km du sol environ) des poussières qui obscurcissent un peu la lumière du soleil, et vont rester "en l'air" très longtemps (quelques mois ou années). L'une des théories pour expliquer la disparition des dinosaures, par exemple, a longtemps été une activité volcanique si intense qu'elle aurait obscurci le ciel en mettant des quantités considérables de poussières dans la stratosphère, ce qui aurait significativement refroidi la Terre et fait périr quasiment toutes les espèces à l'époque. En fait l'hypothèse qui tient la corde aujourd'hui est l'impact d'un météorite, qui aurait eu à peu près le même effet (plein de poussières dans la stratosphère), mais cela illustre qu'un changement climatique majeur peut déboucher sur une crise massive d'extinctions.

➤ sur de très longues périodes, le climat varie en fonction de la dérive des continents :

- ▶ c'est l'installation d'une plaque continentale au Pôle Sud qui a permis l'apparition d'une calotte polaire permanente, ce qui a un effet sur le climat planétaire dans son ensemble,
- ▶ La dérive des continents influe sur la forme des bassins océaniques, ce qui en retour peut modifier le parcours des courants marins, qui transportent plus ou moins d'énergie des tropiques vers les pôles.
- ▶ La dérive des continents a aussi créé des chaînes de montagnes, qui ont assurément une influence locale importante sur le climat !

➤ Le climat varie en fonction du pouvoir réfléchissant de la Terre, qui conditionne la quantité d'énergie solaire qui repart vers l'espace sans avoir été exploitée par la machine climatique. Ce pouvoir réfléchissant - que les physiciens appellent "albedo" - augmente avec l'étendue globale de la glace sur terre (par exemple de la banquise), augmente avec la désertification (naturelle ou pas), mais diminue quand une forêt apparaît à la place d'une savane ou prairie (les forêts sont des surfaces généralement peu réfléchissantes, sauf les forêts boréales en hiver, couvertes de neige).

Il est donc certain que l'homme n'est pas le seul facteur de variation du climat passé, mais va-t-il désormais être le principal sur les siècles qui viennent ? Et là la réponse est que [probablement oui](#).....

L'augmentation de l'effet de serre est-elle la seule influence de l'homme sur le climat ?

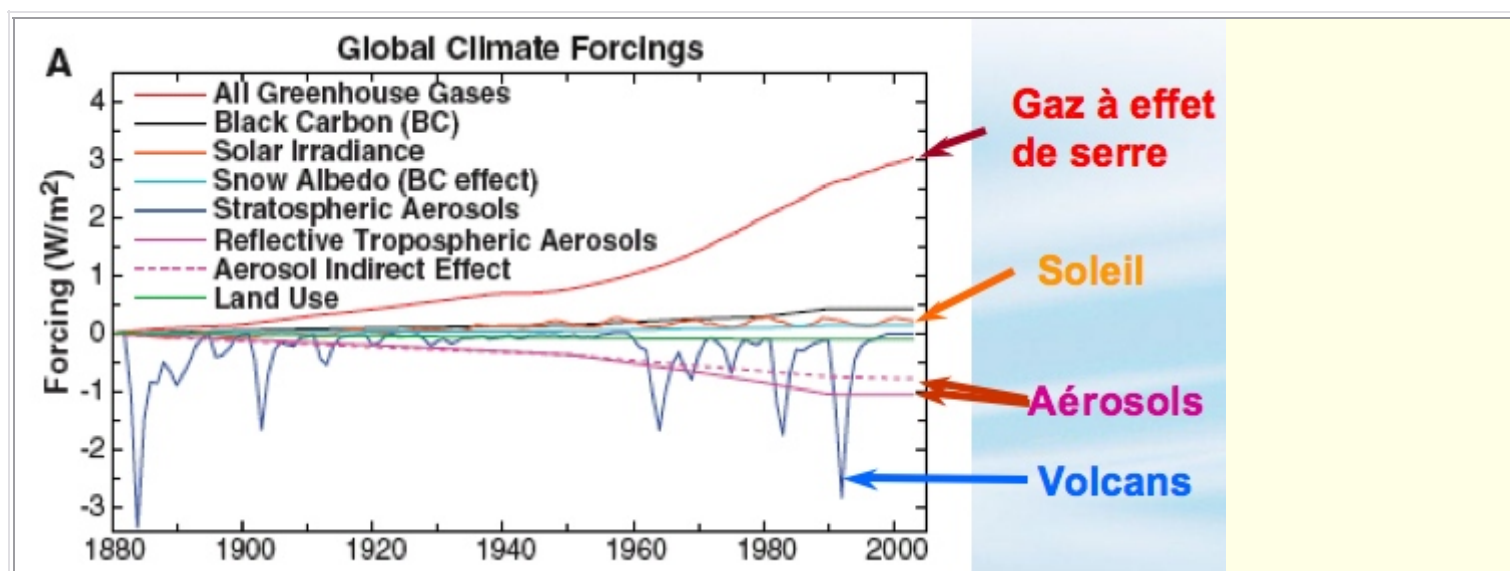
Une autre question survient assez fréquemment dans le "dossier climatique" : n'aurions nous pas d'autres influences sur le climat que l'augmentation de l'effet de serre ? En fait il s'avère que nous en avons beaucoup d'autres, mais, actuellement, toutes les autres sont secondaires en regard de l'[augmentation de l'effet de serre](#), à l'exception des émissions d'aérosols dont l'effet n'est pas négligeable sur le climat (et qui sont [détaillés sur une autre page](#)) :

- l'homme peut avoir une influence notable sur le cycle local de l'eau, et donc sur le climat local, soit en mettant un barrage en eau (cela s'est constaté dans le cas du barrage d'Assouan, en Egypte), soit en supprimant une étendue d'eau existante (dans le cas de la Mer d'Aral par exemple). Une perturbation du cycle local de l'eau (dans le sens d'un assèchement) se constate aussi à la suite du défrichement d'une forêt (de la déforestation, donc).
- la concentration urbaine crée des augmentations locales de température, particulièrement la nuit, d'une part à cause d'un usage localement important de l'énergie (chauffage en hiver ou de climatisation en été, circulation intense, etc), et d'autre part à cause de l'inertie thermique des bâtiments,
- La désertification modifie le pouvoir réfléchissant des surfaces touchées, en général en l'augmentant (une forêt est souvent plus sombre, donc absorbe mieux l'énergie solaire, qu'une surface agricole). Or en augmentant la réflexion de l'énergie solaire, on diminue le chauffage du sol, ce qui a un effet sur le climat local,
- la mise en culture d'une forêt a le même effet : une forêt est en général une surface moins réfléchissante pour le soleil qu'un champ ou une prairie.

Peut-on comparer tous ces effets ?

Tous les facteurs de variation du climat mentionnés ci-dessus, qu'ils soient "naturels" ou d'origine humaine, ne se produisent pas au même rythme (l'effet climatique de la dérive des continents, en un siècle, n'est pas très important !). Les [scientifiques qui](#)

[travaillent sur le climat](#) ont bien sûr regardé comment se comparent ces effets entre eux à l'échelle du siècle, et comment ils se comparent à l'augmentation de l'effet de serre. La conclusion est pour le moment claire : à l'échelle des temps historiques, l'effet de serre d'origine humaine est sorti du "bruit de fond" pour devenir le premier facteur de variation du climat (on parle de "forçage", c'est à dire de perturbation par rapport à un état stable), et pourrait l'[être de plus en plus à l'avenir](#).



Comparaison des influences respectives sur le climat des émissions humaines et des facteurs "naturels" de variation du climat pour le dernier siècle.

- Les facteurs "naturels" comprennent essentiellement le volcanisme (influence temporairement significative mais durant peu de temps) et la variation de l'activité solaire.
- Les facteurs "humains" (ou "anthropiques") comprennent les [gaz à effet de serre](#) et les [aérosols](#).

On constate aisément que les facteurs naturels, qui dominaient les forçages il y a 1 siècle (en particulier le volcanisme), sont aujourd'hui "supplantés" par les facteurs d'origine humaine. C'est bien ce changement

d'ordre de grandeur qui est la cause du problème.

Source : Hansen et. al, Science 2005

Météo et climat, c'est pareil ?

dernière version : décembre 2004

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

L'un des arguments parfois mis en avant pour expliquer que le changement climatique que nous avons mis en route reste hypothétique est la survenue d'un événement météo qui n'est pas "conforme" à l'évolution générale attendue :

- des températures très basses l'hiver
- un "été pourri" dans le midi,
- un manteau neigeux abondant dans les Alpes une année....

Ce faisant, nous effectuons une confusion fréquente : celle de penser que l'on peut mettre sur le même plan la météo et le climat, alors que nous parlons là de deux manières très différentes de considérer "le temps qu'il fait".

➤ La **météo**, cela désigne le temps qu'il fait "tout de suite", ou dans pas très longtemps, et "devant ma porte", ou pas très loin. Elle se définit donc par des valeurs **instantanées** et **locales** de la température, des précipitations, de la pression, de la nébulosité

(c'est-à-dire de la couverture nuageuse), etc. Pour faire de la météo, il suffit, pour l'essentiel, de "lever le nez", c'est-à-dire de regarder ce qui se passe dans **l'atmosphère**. Pour faire cela, on utilise des stations au sol (température, précipitations, pression au sol), des ballons-sondes ou des satellites (température et pression en altitude, précipitations sur de larges zones, notamment l'océan, etc). Une fois que l'on dispose d'une bonne description de ce qui se passe "au-dessus de nos têtes" sur un court intervalle de temps (quelques jours), il suffit alors, pour connaître le temps qu'il va faire dans les jours à venir à un endroit donné, de "prolonger" l'évolution atmosphérique observée sur quelques jours. Un modèle de météo est donc un modèle purement atmosphérique, mais cela est bien suffisant pour faire de bonnes prévisions à l'échelle de quelques jours : malgré tout ce que nous pouvons en dire, la tendance prévue par la météo est souvent la bonne !

➤ Là où les choses se compliquent, c'est que lorsque nous parlons climat nous parlons aussi de température, de précipitations, de pression, de nébulosité, etc. La grande différence, c'est qu'au lieu de parler de valeurs instantanées et locales, nous allons surtout parler de valeurs **moyennes** sur des années ou des dizaines d'années, et sur des zones géographiques qui sont en général importantes : continents ou fractions de continent. Un climat n'est pas dit tempéré parce qu'il a fait une température donnée en un lieu donné le 3 janvier, mais parce que les températures sont "en moyenne" comme ceci l'hiver, et "en moyenne" comme cela l'été, et que il pleut "en moyenne" tant dans l'année, etc. Et ce "en moyenne" fait référence à des valeurs qui ont été mesurées sur des dizaines d'années, non sur une seule.

Il est bien sûr possible de passer de la météo au climat : avec l'ensemble des relevés journaliers et locaux, on construit facilement des moyennes pluriannuelles et sur des zones larges. Par contre, il sera facile de comprendre que l'inverse n'est pas vrai : avec des évolutions qui portent sur les moyennes (ce qui correspond aux sorties des [modèles pour le climat futur](#)), il ne sera pas facile - voire pas possible - de reconstituer l'évolution locale et instantanée de la température ou du vent. Un exemple tiré de la vie de tous les jours permettra facilement de comprendre cela : admettons que nous sachions que la moyenne d'une classe est montée de 2 points. Pouvons nous en déduire pour autant que la note du petit Martin ou de la petite Dupond ont aussi monté de 2 points ? Bien sûr que non : on peut très bien avoir une moyenne qui va dans un sens avec la note de tel ou tel élève qui va dans l'autre.

Pour le climat et la météo, c'est pareil : on peut très bien avoir la moyenne qui va dans un sens, avec un événement ponctuel qui va dans l'autre. Si en plus on se rappelle que la surface de la France, c'est 0,1% seulement de la surface planétaire, alors il est facile de comprendre que la [tendance générale au réchauffement](#) (qui fait référence à la moyenne planétaire sur quelques dizaines d'années au moins) n'est pas infirmée par un hiver froid ou un été frais en France ou en Italie ou en Floride ou en Mongolie.

C'est pour cela qu'à la question de savoir si un événement nouveau ou inhabituel - comme les tempêtes de 1999 - qui est, au départ, un événement météorologique (il a pris place à un endroit donné et sur une courte période de temps), est aussi le signe d'un changement climatique, la science est pour le moment sans réponse satisfaisante : il faut attendre de savoir si, "en moyenne", ce genre de chose va se produire plus souvent. Dit autrement, nous aurons la réponse quand il sera trop tard pour anticiper quoi que ce soit.

Bien sûr, tout comme la météo, le climat varie, mais [pas aux mêmes échelles de temps](#) !

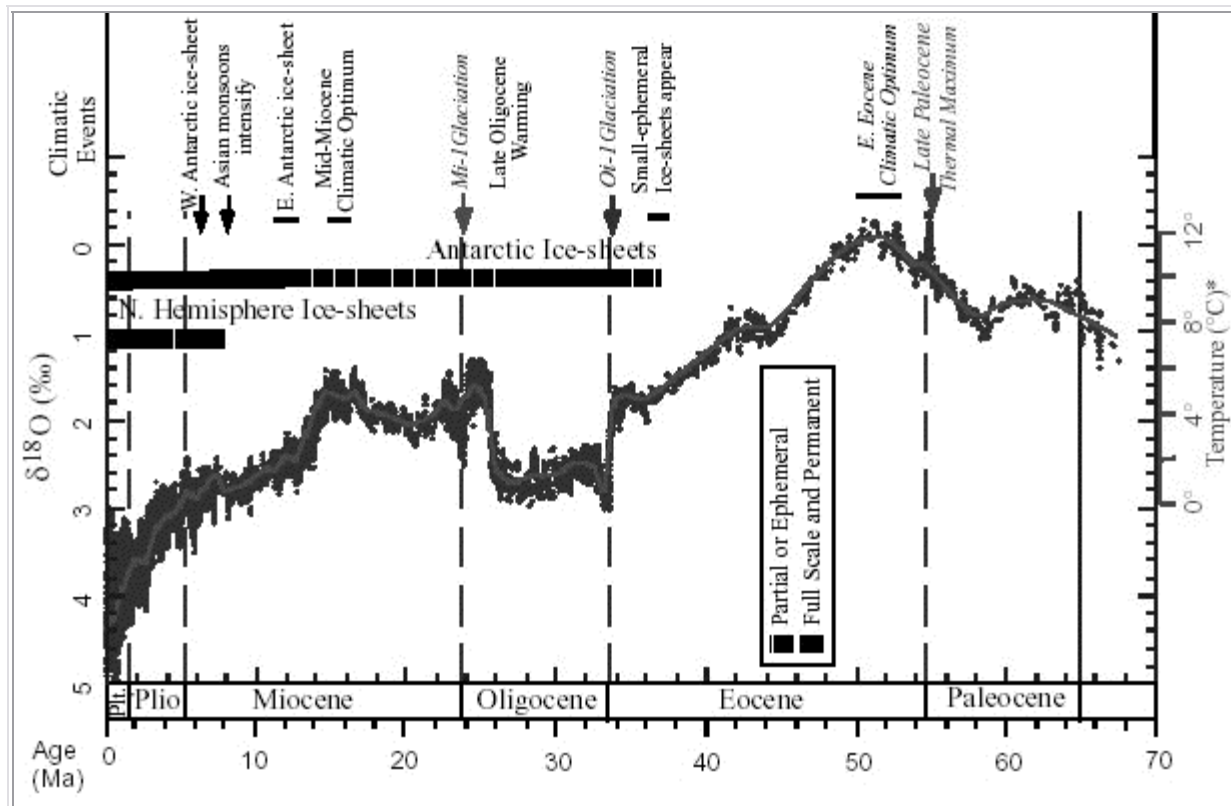
➤ La variation la plus rapide et la plus importante du climat régional est bien sûr le cycle des saisons, qui fait facilement gagner ou perdre deux dizaines de degrés de température moyenne aux moyennes latitudes.

➤ puis, si nous nous cantonnons uniquement aux moyennes annuelles de température ou de précipitations, nous allons trouver des grandes oscillations type El Nino, susceptible de faire varier significativement le climat régional pendant quelques années,

➤ des changements massifs d'un climat régional peuvent survenir en quelques dizaines d'années ou quelques siècles comme conséquence d'une modification des courants océaniques régionaux qui se produisent au même rythme (comme par exemple les ["arrêts" du Gulf Stream dans le passé](#)),

➤ à l'échelle de quelques millénaires et de l'ensemble du globe, nous pouvons trouver les entrées en glaciation (qui prennent typiquement de l'ordre de 10.000 ans).

➤ enfin le climat peut lentement évoluer à l'échelle de dizaines de millions d'années, ce qui est par exemple le cas du lent refroidissement que notre planète a connu "en moyenne" depuis le milieu de l'ère tertiaire. Cette fois-ci, c'est la dérive des continents qui est en cause ! (voir plus bas)



Estimation de la température moyenne de la planète (par rapport à aujourd'hui, le 0 de l'échelle de droite représentant la température moyenne du dernier millier d'années) sur les 70 millions d'années écoulées. L'axe horizontal du bas donne l'ancienneté par rapport à aujourd'hui, en millions d'années. Attention ! Une graduation de l'axe du bas fait 2 millions d'années, et l'époque est d'autant plus ancienne que l'on va vers la droite.

Rappelons que la moyenne planétaire est aujourd'hui de 15 °C, mais que si nous faisons la moyenne sur le dernier million d'années nous obtiendrons quelque chose de plus proche de 11 ou 12 °C, car la terre a été en période glaciaire l'essentiel du dernier million d'années.

Source : Zachos et al., Science, 2001

Bien sûr, dans toute évolution lente il peut se glisser des variations plus rapides, mais il faut bien se garder de confondre la tendance de fond avec les variations rapides en question. Un changement de climat n'est pas caractérisé dès que la température d'un jour donné - ou même d'une semaine donnée - a connu un écart important par rapport à la moyenne, ou même à l'évolution lente de cette moyenne.

Suffit-il de "lever le nez" pour comprendre le climat ?

Une autre grande différence entre climat et météo est que le climat n'est pas uniquement déterminé par ce qui se passe dans l'atmosphère : pour étudier le comportement du climat, il ne suffit pas de "lever le nez pas très haut". En effet, le fonctionnement de la machine climatique est conditionné par énormément d'éléments, dont tous, du reste, ne font pas partie du système "planète terre". En voici une liste (non limitative) :

- le soleil, et la plus ou moins grande quantité d'énergie qu'il émet, car cela conditionne la quantité d'énergie qui est "injectée" dans la machine climatique terrestre,
- les [paramètres astronomiques de la terre](#), qui conditionnent aussi la quantité de rayonnement solaire qui parvient sur la terre, et surtout sa répartition saisonnière,
- la composition de l'atmosphère, qui conditionne l'[effet de serre](#), et donc le "chauffage supplémentaire" du sol,
- les volcans, qui conditionnent la quantité d'[aérosols](#) envoyés dans l'atmosphère, et donc, au contraire, le "refroidissement" du climat,
- les océans, qui, avec l'atmosphère, "amortissent" considérablement les écarts de température entre la nuit et le jour, et entre l'hiver et l'été,

- les glaces polaires, d'une part parce que leur étendue conditionne le pouvoir réfléchissant global de la terre (mais de manière secondaire par rapport aux nuages), et surtout parce que leur volume conditionne la hauteur des océans (en période glaciaire les calottes sont bien plus massives, et du coup l'océan bien plus bas),
- la végétation, qui conditionne le cycle local de l'eau (les arbres sont des machines à évaporer, et en moyenne il pleut plus au dessus des zones boisées qu'au-dessus des terres défrichées), et qui conditionne aussi le pouvoir réfléchissant de la surface : une forêt et un champ n'ont pas le même pouvoir de réflexion du rayonnement solaire, ce qui a bien sûr de l'importance,
- la dérive des continents, qui change la répartition régionale de la réflexion du rayonnement (l'eau océanique réfléchit moins le rayonnement que les terres émergées : si la dérive des continents met de la terre là où il y avait de l'eau, cela change la proportion de rayonnement réfléchi à cet endroit du globe, et donc le climat local, voire global). Cette dérive permet aussi, si la terre remplace l'eau aux poles, l'installation d'une calotte polaire (sur l'océan, il ne peut y avoir que de la banquise, bien moins volumineuse), qui va en retour changer le niveau des océans et la température moyenne de l'hémisphère,
- etc....

Et pour finir, si l'homme est incontestablement devenu un agent climatique en [modifiant l'effet de serre de l'atmosphère](#), ce qui va engendrer une modification lente (mais [potentiellement majeure à terme](#)) du climat, il n'est pas encore devenu un agent météorologique, capable de changer instantanément le temps qu'il fait en un claquement de doigts !

Quels sont les gaz à effet de serre ?

dernière version : août 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

La définition d'un gaz à effet de serre est à la fois très simple et très compliquée pour le profane : un "gaz à effet de serre" est tout simplement un gaz présent dans l'atmosphère terrestre et [qui intercepte les infrarouges émis par la surface terrestre](#). Ce sont des

gaz dont nous n'avons pas entendu parler depuis "tout petit déjà" parce que ni l'azote ni l'oxygène, les deux gaz les plus abondants dans l'atmosphère (78% et 21% respectivement), que beaucoup d'entre nous connaissent, n'ont cette propriété (pour les amateurs de précisions, un gaz ne peut absorber les infrarouges qu'à partir de 3 atomes par molécule, ou à partir de deux si ce sont deux atomes différents. Du coup ni l'azote - diazote pour être précis - ni l'oxygène - dioxygène pour l'être tout autant - ne sont dans la catégorie des gaz à effet de serre). Mais une fois que nous avons dit cela, quels sont ces gaz exactement ? Et l'homme en est-il le seul émetteur, comme le sous-entendent parfois certains propos entendus dans les media ?

Les gaz "naturels" à effet de serre

Les deux principaux gaz responsables de l'[effet de serre](#) de la Terre, depuis que notre planète a une atmosphère qui ressemble à l'actuelle (ce qui fait bien quelques centaines de millions d'années !) sont :

- la vapeur d'eau (H_2O),
- le gaz carbonique (CO_2).

Il en existe d'autres, et même beaucoup d'autres. Certains, comme le CO_2 et la vapeur d'eau, sont "naturels", c'est-à-dire qu'ils étaient présents dans l'atmosphère avant l'apparition de l'homme. Cette présence ancienne signifie, par la force des choses, qu'ils possèdent des sources naturelles, mais aussi des "puits", qui retirent les gaz en question de l'atmosphère et permettent à la concentration de rester à peu près stable. Pour la vapeur d'eau le "puits" s'appelle... la pluie, et pour le CO_2 une partie du [puits](#) est tout simplement la photosynthèse.

Outre la vapeur d'eau et le gaz carbonique, les principaux gaz "naturels" à effet de serre sont :

- le méthane (CH_4), qui n'est rien d'autre que... le gaz "naturel" de nos cuisinières,
- le protoxyde d'azote (N_2O), nom savant du.... gaz hilarant (qui ici ne l'est plus tellement),

➤ l'ozone (O₃), molécule formée de trois atomes d'oxygène (les molécules du gaz oxygène "normal" comportent 2 atomes d'oxygène seulement).

Dire que ces gaz sont "naturels" - et donc qu'ils ont des sources naturelles - ne signifie bien évidemment pas que l'homme n'a pas d'influence sur leurs émissions ou sur leur concentration dans l'atmosphère. Pour les 3 gaz mentionnés ci-dessus, comme pour le CO₂, il est avéré que l'homme [ajoute sa part et a augmenté leur concentration dans l'air de manière significative](#). C'est du reste pour cela que, comme pour le CO₂, le méthane et le protoxyde d'azote sont pris en compte dans les [accords internationaux](#) comme le protocole de Kyoto par exemple. Ce n'est pas le cas de [l'ozone](#), mais cela est dû à des difficultés pratiques et non à une absence d'influence sur le climat.

Les gaz "industriels" à effet de serre

A côté des gaz "naturels" à effet de serre, il en existe d'autres, que nous pouvons qualifier d' "artificiels" : ils s'agit de gaz industriels qui ne sont présents dans l'atmosphère qu'à cause de l'homme. Les principaux gaz "industriels" à effet de serre sont les **halocarbures** (formule générique de type C_xH_yHal_z où **Hal** représente un ou plusieurs halogènes) : il s'agit d'une vaste famille de gaz obtenus en remplaçant, dans une molécule d'[hydrocarbure](#) (le propane, le butane, ou encore l'octane, que l'on trouve dans l'essence, sont des [hydrocarbures](#)), de l'hydrogène par un gaz [halogène](#) (le fluor, le chlore...). Les molécules ainsi obtenues ont deux propriétés importantes pour nous :

➤ Elles absorbent très fortement les infrarouges, beaucoup plus que le gaz carbonique à poids égal,

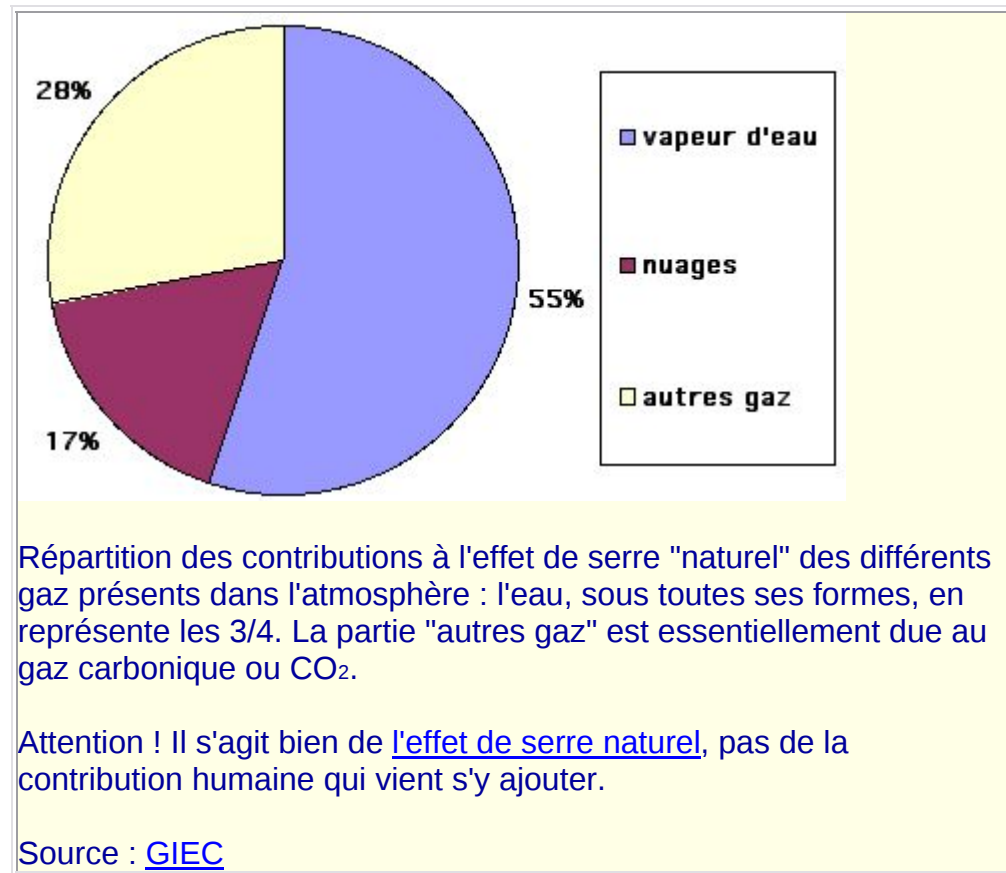
➤ Certaines d'entre elles (les perfluorocarbures par exemple) sont très "solides" : elles sont chimiquement très stables dans l'atmosphère, et seule la partie la plus "énergique" du rayonnement solaire et intersidéral (les ultraviolets et les rayons cosmiques) peut "casser" les liaisons de ces molécules une fois qu'elles sont dans l'atmosphère. Comme ces processus sont lents et n'interviennent que loin du sol, ces molécules d'halocarbures ont donc des durées de vie dans l'atmosphère qui peuvent être très longues, car il faut attendre qu'elles diffusent dans la stratosphère - donc qu'elles montent haut alors qu'elles sont souvent très lourdes - avant d'être "cassées", et cela peut prendre des milliers d'années.

Une famille particulière d'halocarbures, les CFC, a la double propriété de contribuer à l'augmentation de l'effet de serre, mais aussi de diminuer la concentration de l'[ozone stratosphérique](#) (la fameuse "couche d'ozone", qui en fait n'est pas vraiment une couche). La production de ces gaz est désormais interdite (ou en cours d'éradication), au titre du protocole de Montréal signé en 1987, qui ne concerne pas les autres gaz à effet de serre.

Il existe également un autre gaz industriel que l'on mentionne souvent dans les milieux spécialisés, l'hexafluorure de soufre (SF₆). Il est utilisé par exemple pour les applications électriques (transformateurs) et... les doubles vitrages. Il n'est pas émis en grande quantité mais est encore plus absorbant pour les infrarouges et résistant à la partie "dure" du rayonnement solaire que les halocarbures.

Quels sont les gaz qui font le plus d'effet de serre et d'où viennent-ils ?

Si nous ne nous occupons pas de la raison pour laquelle les gaz à effet de serre sont dans l'atmosphère, celui qui engendre le plus d'effet de serre est... la vapeur d'eau.



Mais si l'on se limite à l'effet de serre **d'origine humaine**, que l'on appelle parfois effet de serre "additionnel" (parce qu'il se rajoute à celui d'origine naturelle), ou **anthropique**, la répartition par gaz est totalement différente (merci de ne pas me faire remarquer que le total fait 105% ! Les pourcentages ont été arrondis...) :

➤ **Les émissions directes de vapeur d'eau des hommes** (provenant des centrales électriques - pas seulement nucléaires ! - , de l'irrigation, des barrages, de la déforestation...) **ne contribuent pas à augmenter l'effet de serre de manière décelable**, et ne sont donc pas prises en compte dans les émissions humaines. En effet, sur une planète couverte aux 2/3 d'eau (les océans), et compte

tenu du fait que l'eau ne s'accumule pas dans l'atmosphère - où son temps de résidence est de l'ordre d'une semaine seulement -, les émissions d'origine humaine sont totalement marginales dans le cycle global de l'eau (à titre indicatif, les émissions annuelles de vapeur d'eau de l'humanité provenant de la combustion des hydrocarbures représentent moins de 1% de l'évaporation naturelle survenant en une seule journée). L'action de l'homme peut très significativement perturber le cycle local de l'eau (la Mer d'Aral ou le barrage d'Assouan en offrent de bons exemples), mais cela n'a pas de répercussions significatives au niveau de la teneur moyenne en vapeur d'eau de l'ensemble de l'atmosphère, or c'est celle-là qui gouverne l'effet de serre qui en résulte.

Ce qui précède explique pourquoi il n'est pas tenu compte de la vapeur d'eau, excepté dans quelques cas bien particuliers [tels l'aviation](#), lorsque l'on calcule les émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine.

➤ **Le gaz carbonique d'origine humaine est responsable d'un peu plus de 55% de l'effet de serre additionnel dû à l'homme** . Ce gaz comporte bien sûr des émissions naturelles (la respiration des animaux, une partie de la putréfaction, les incendies naturels, ou encore le réchauffement de l'océan de surface) très importantes, mais elles sont [compensées par des "puits" tout aussi importants](#) (le refroidissement d'autres portions de l'eau océanique de surface, et la photosynthèse). Le gaz carbonique venant des activités humaines (on parle d'émissions [anthropiques](#), c'est à dire provoquées par l'homme) provient :

- ▶ pour l'essentiel de la combustion des [énergies fossiles](#) (charbon, pétrole, gaz),
- ▶ pour partie de certaines industries (par exemple pour la production de ciment),
- ▶ enfin pour une part non négligeable de la déforestation, notamment en zone tropicale (voir la [page sur les puits](#) pour les explications).

➤ **Le méthane engendre un peu plus de 15% de l'effet de serre anthropique**. Le méthane est un gaz qui se forme dès qu'un composé organique (un reste d'animal ou de plante) se décompose à l'abri de l'oxygène de l'air (par fermentation ou putréfaction), par exemple au fond de l'eau ou sous terre. Les [réserves de gaz naturel ne se sont pas formées autrement](#) que par la décomposition, il y a très longtemps, de plantes et d'animaux, qui se sont d'abord transformés en hydrocarbures liquides, puis en gaz. Une partie du méthane présent dans l'atmosphère est donc d'origine parfaitement naturelle, provenant notamment des zones humides (marécages, marais, etc) et...des termites !

Mais l'homme y rajoute sa part. Le méthane d'origine humaine provient :

- ▶ pour une part de la combustion de matière organique, notamment des brûlis en zone tropicale (la combustion du bois est toujours une combustion imparfaite, qui libère dans l'atmosphère des composés mal ou pas brûlés, dont du méthane),
 - ▶ de l'élevage des ruminants (vaches, moutons, chèvres, yaks...), car les aliments qu'ils ingèrent fermentent dans leur estomac, en dégageant du méthane (à titre informatif il y a environ 20 millions de bovins en France : le poids des vaches est supérieur au poids des hommes !),
 - ▶ de la culture du riz, car les zones humides en général émettent du méthane (ce gaz se forme dès que des composés organiques se décomposent - "pourrissent" - à l'abri de l'oxygène de l'air, comme par exemple au fond des marécages, ou encore dans les sédiments océaniques),
 - ▶ des décharges d'ordures ménagères (encore le "pourrissement" à l'abri de l'oxygène de l'air),
 - ▶ des exploitations pétrolières et gazières, à cause des fuites de gaz (le méthane est le principal constituant du gaz naturel), et des mines de charbon (le méthane est le principal constituant du grisou).
- Les [halocarbures](#) engendrent un peu plus de 10% de l'effet de serre anthropique (ces gaz n'ont pas d'émissions naturelles). Les premiers représentants de cette famille sont connus de tous : il s'agissait des CFC, désormais remplacés par d'autres gaz voisins, mais qui ne [détruisent pas l'ozone stratosphérique](#). Ces gaz sont utilisés :
- ▶ comme gaz réfrigérants (dans les systèmes de climatisation et les chaînes du froid) ; les émissions de ce poste proviennent essentiellement des fuites et mise à la décharge des systèmes de climatisation,
 - ▶ comme gaz propulseurs dans des bombes aerosols ; les fameux CFC constituent une sous-famille devenue célèbre des halocarbures. Le Protocole de Montreal a décidé leur éradication progressive car, en plus d'être de puissants gaz à effet de serre, ils sont aussi [responsables de la diminution de l'ozone en haute altitude](#),

► dans certains procédés industriels (fabrication de mousses plastiques, mais aussi...de composants d'ordinateurs ou de téléphones portables).

► **Le protoxyde d'azote (N_2O) engendre environ 5% de l'effet de serre anthropique.** Pour ce gaz il y a aussi des émissions naturelles, qui proviennent essentiellement des zones humides. La part "humaine" (anthropique) provient

► de l'utilisation des engrais azotés en agriculture,

► de certains procédés chimiques.

► **L'ozone (O_3) troposphérique engendre enfin environ 10% de l'effet de serre anthropique.** L'ozone est une variante de l'oxygène (une molécule d'ozone comporte 3 atomes d'oxygène au lieu de 2 pour le gaz "oxygène" normal) qui est naturellement présent dans l'atmosphère. Selon l'endroit où il se trouve il nous intéresse beaucoup ou il nous est nuisible :

► dans la haute atmosphère, où l'on parle d'**ozone stratosphérique** (la stratosphère est la couche de l'atmosphère située entre 10 et 50 km d'altitude), il arrête les ultraviolets du soleil qui ont tendance à "casser" les liaisons chimiques indispensables à la vie ; il nous y est donc très utile (sans cette couche d'ozone stratosphérique la vie évoluée n'existerait probablement pas en dehors des océans),

► dans nos villes, bien qu'il continue aussi à arrêter les ultraviolets les plus agressifs qui viennent du soleil (mais près du sol il n'en reste plus beaucoup à arrêter, heureusement), il montre aussi une autre de ses facettes, c'est que c'est un oxydant très agressif, et donc que nos poumons n'aiment pas beaucoup en respirer. L'ozone troposphérique (la **troposphère** est la couche la plus basse de l'atmosphère, celle qui "touche" le sol, et elle va jusqu'à la stratosphère, à environ 10 km du sol) est l'un des composants de la pollution locale, et provient indirectement de la combustion d'hydrocarbures. Ce terme de l'effet de serre est donc - outre le CO_2 - une conséquence de l'utilisation des énergies fossiles (pour plus d'explications sur l'ozone, [voir cette page](#)).

Depuis le début de l'ère industrielle, c'est à dire depuis l'année 1750 environ, ce que nous avons mis dans l'atmosphère a pour effet d'introduire un "forçage radiatif" de l'ordre de 1% du rayonnement reçu.

Dit autrement, à travers ses émissions de gaz à effet de serre l'homme a modifié la situation "comme si" le soleil avait augmenté sa puissance d'environ 1%. Cela peut paraître peu. Pourtant, compte tenu des énergies considérables qui sont en jeu, de la fragilité de certains équilibres naturels, et du fait que ces effets agissent sur de longues périodes, c'est [très significatif pour notre avenir](#).

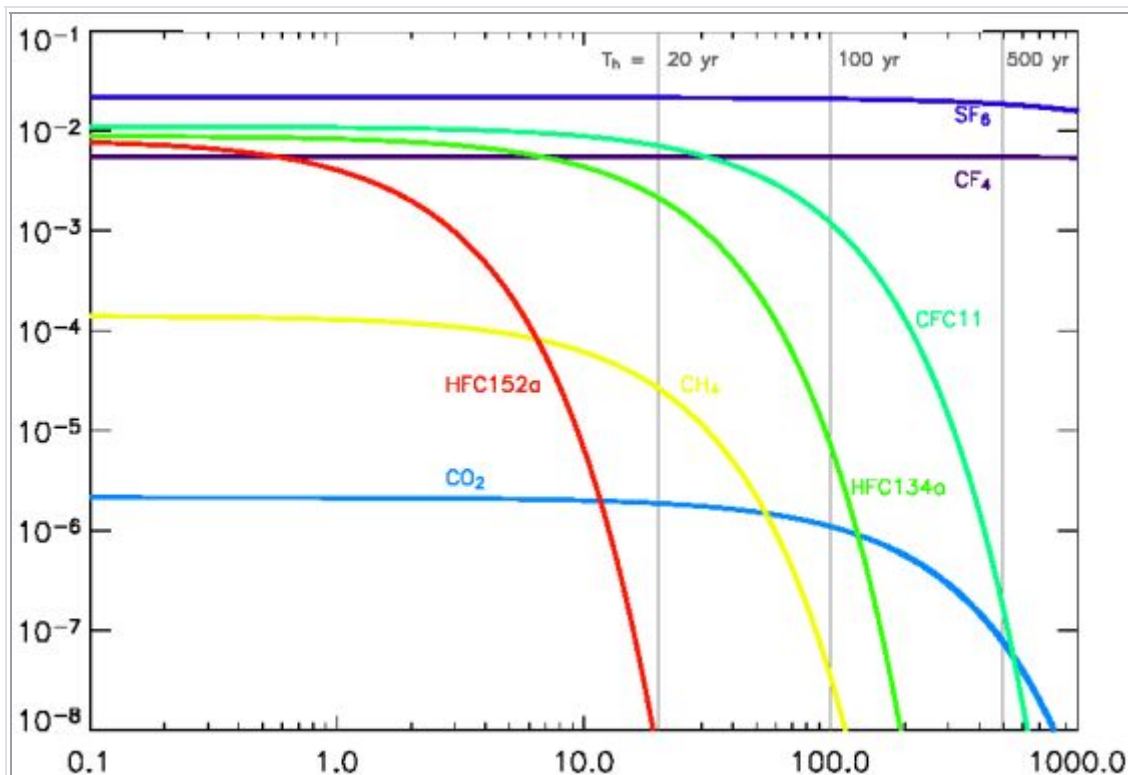
Combien de temps restent-ils dans l'atmosphère ?

Les gaz à effet de serre, une fois dans l'atmosphère, n'y restent bien évidemment pas éternellement, mais... cela peut prendre un certain temps de les évacuer de cet endroit. L'épuration des gaz à effet de serre de l'atmosphère peut survenir :

- par un phénomène physique. Par exemple la pluie, phénomène physique (condensation), enlève de la vapeur d'eau de l'atmosphère.
- par une réaction chimique intervenant au sein de l'atmosphère. C'est le cas pour le méthane, qui s'élimine par réaction avec des radicaux OH (qui s'appellent des radicaux hydroxyle) naturellement présents dans l'atmosphère, pour donner du CO₂.
- par une réaction chimique, photochimique ou physique intervenant à la frontière entre l'atmosphère et les autres compartiments de la planète. C'est par exemple le cas pour le CO₂, qui est réduit par la photosynthèse des plantes (réaction photochimique), ou qui est dissous dans l'océan (réaction physique) pour finir par y donner des ions bicarbonate et carbonate (par contre le CO₂ est chimiquement stable dans l'atmosphère, et il n'y a pas de réaction purement chimique prenant place au sein de l'atmosphère qui "élimine" ce gaz),
- soit par suite d'un phénomène radiatif. Par exemple les rayonnements électromagnétiques "durs" émis par le soleil - ainsi que les rayons cosmiques, qui sont de même nature que les rayons émis par une source radioactive - "cassent" des molécules dans la haute atmosphère. Une partie des halocarbures disparaît de cette façon (ce sont généralement des molécules trop stables pour disparaître par réaction chimique dans l'atmosphère) ; certains halocarbures sont cependant encore suffisamment réactifs (encore

suffisamment proches des hydrocarbures) pour disparaître comme le méthane, par réaction chimique avec d'autres composés de l'atmosphère.

Mais la très mauvaise surprise, c'est que mis à part la vapeur d'eau, qui s'évacue en quelques jours, les gaz à effet de serre mettent **très longtemps** à s'en aller de l'atmosphère. Cela n'est pas facile de savoir avec précision combien de temps sera nécessaire pour évacuer ce que nous émettons aujourd'hui, car l'atmosphère est un système très complexe, faisant intervenir tout un ensemble de phénomènes (physiques, chimiques, biologiques...), dont les scientifiques n'ont pas encore perçé tous les mystères (on ne se doute pas, quand on regarde en l'air, que c'est si compliqué !). En outre l'augmentation de la concentration dont nous sommes à l'origine va trop vite pour qu'il soit facile de s'inspirer de ce qui s'est passé aux époques anciennes sur la vitesse d'élimination du surplus. Disons que ça va prendre longtemps !



Ce graphique représente le forçage radiatif résiduel, au cours du temps, et en watts par mètre carré, provenant d'une d'une tonne de gaz émise à l'instant 0. Avec un simple changement d'unité sur l'axe vertical, ce graphique pourrait tout aussi bien représenter la concentration supplémentaire dans l'atmosphère, au cours du temps, qui suit l'émission d'une tonne de gaz à effet de serre à l'instant 0. NB : comme les axes de ce graphique sont gradués en échelle dite logarithmique - chaque changement de graduation correspond à une multiplication par 10 - il n'y a pas de zéro au croisement des axes, mais c'est tout comme.

On voit qu'il faut attendre de l'ordre du siècle avant que le CO_2 ne commence à être évacué de l'atmosphère, de l'ordre de 10 ans pour le méthane, mais que certains halocarbures (par exemple

le CF₄, en haut du diagramme) n'ont toujours pas commencé à s'épurer significativement de l'atmosphère au bout de 1.000 ans.

Cette simple caractéristique "physique" explique pourquoi le changement climatique est un processus fondamentalement irréversible, qu'il sera complètement impossible d'inverser à bref délai le jour où l'expérience nous importunera pour de bon.

Source : D. Hauglustaine, LSCE

Ce qu'illustre le graphique précédent est une notion de "vitesse d'élimination", qui peut servir à définir une **durée de séjour** approximative, c'est à dire le temps qui est nécessaire à ce que le gaz en surplus commence à s'évacuer de l'atmosphère. Bien entendu cette durée de séjour (ou de résidence) n'est valide que pour autant que les conditions restent "égales par ailleurs".

Gaz	Durée de séjour approximative dans l'atmosphère
Gaz carbonique (CO₂)	100 ans
Méthane (CH₄)	12 ans
Protoxyde d'azote (N₂O)	120 ans
Halocarbures (C_nHal_p)	jusqu'à 50.000 ans

On voit immédiatement ci-dessus que l'essentiel des gaz que nous émettons aujourd'hui, y compris le gaz carbonique que nous avons par exemple émis ce matin en venant travailler en voiture, ou hier en faisant fonctionner une chaudière de logement ou un four à verre, sera encore au-dessus de la tête de nos (arrière-arrière-)petits-enfants dans 1 ou 2 siècles. Et bien sûr, pendant tout le temps que ces gaz restent au-dessus de nos têtes, ils contribuent à un effet de serre supplémentaire.

Peut-on comparer les gaz entre eux ?

Afin de pouvoir faire des comparaisons (ce qui est essentiel pour pouvoir faire des plans d'action, car tant que l'on ne sait pas si il est préférable d'éviter l'émission de 1 kg de CO₂ ou de 1 kg de méthane, il est difficile d'établir des priorités, et donc de choisir), il est possible de calculer, pour chacun des gaz à effet de serre, un "pouvoir de réchauffement global" (en abrégé PRG, et en abrégé en anglais GWP, pour Global Warming Potential), qui permet de savoir de combien on augmente l'effet de serre lorsque l'on émet un kg du gaz considéré.

Le pouvoir de réchauffement global d'un gaz se définit comme le "forçage radiatif" (c'est à dire la puissance radiative que le gaz à effet de serre renvoie vers le sol), cumulé sur une durée qui est généralement fixée à 100 ans, d'une quantité de gaz donnée.

En gros c'est une notion qui permet d'appréhender à la fois sa "puissance instantanée" (qui est le forçage radiatif, c'est à dire la quantité de rayonnement qu'il intercepte et renvoie vers le sol), découlant de ses raies d'absorption, et sa durée de séjour dans l'atmosphère.

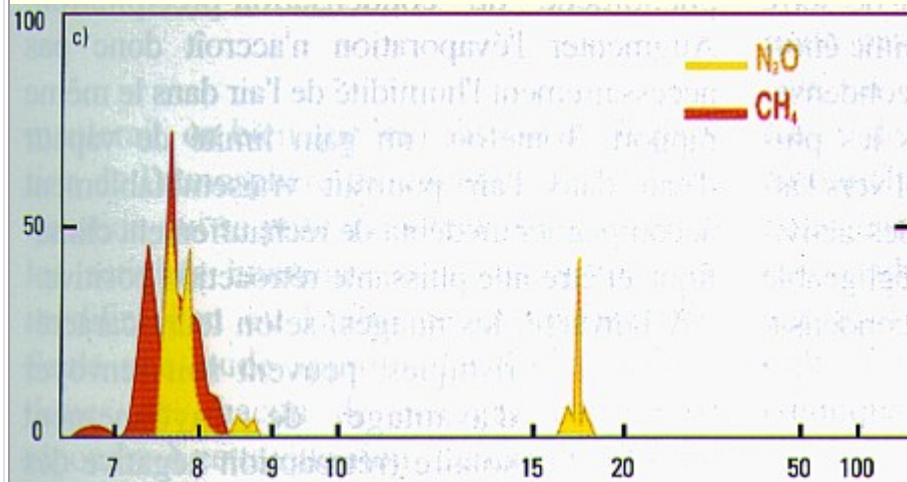
Cette valeur ne se mesure pas dans l'absolu, mais relativement au CO₂. Le PRG d'un gaz est donc "combien de fois plus" (ou combien de fois moins) un gaz "fait d'effet de serre sur 100 ans" (c'est à dire combien d'énergie il renvoie vers le sol sur cette période) comparé à ce que ferait une même quantité de CO₂ émise au même moment. On parle donc de "PRG relatif", dont la définition correspond à la formule très barbare ci-dessous (que ceux qui n'y comprennent rien ne perdent pas espoir ! Ca redevient du français plus bas), où F signifie "Forçage radiatif" et où N est généralement égal à 100 ans .

$$PRG = \frac{\int_0^N F_{gaz}(t)dt}{\int_0^N F_{CO_2}(t)dt}$$

Calculer formellement ce PRG tient à peu près de la mission impossible : cela suppose de spéculer sur l'évolution du forçage radiatif, qui dépend elle-même de l'évolution de l'épuration des gaz de l'atmosphère, de la concentration préexistante - et des émissions à venir - d'autres gaz ayant des raies d'absorption dans les mêmes plages de rayonnement, etc...

En effet, il existe des "zones de recouvrement" entre les différents gaz à effet de serre : plusieurs d'entre eux (par exemple le méthane et le protoxyde d'azote) absorbent les mêmes longueurs d'onde, ce qui fait que l'effet d'un

supplément d'un des gaz n'est pas indépendant de la proportion des autres gaz déjà présents dans l'atmosphère.



Pourcentage du rayonnement absorbé (en ordonnée) selon la longueur d'onde en micromètres (en abscisse) pour le méthane et le protoxyde d'azote dans l'atmosphère. Source Gérard Lambert, Revue du Palais de la Découverte.

Il importe aussi de noter que le temps qu'un gaz reste dans l'atmosphère dépend des conditions du moment : si les puits absorbant le gaz carbonique saturent (deviennent moins efficaces), la durée de séjour dans l'air de ce gaz augmentera. Postuler que la vitesse d'élimination du CO_2 de l'atmosphère sera stable sur 100 ans étant précisément contraire à la conclusion (les choses vont changer) il en résulte que **le PRG est par construction approximatif**.

Le PRG est donc une manière simplifiée de représenter les choses : si l'on voulait être exact, chaque PRG serait une fonction non seulement de la capacité d'absorption propre de chaque gaz, mais aussi de la concentration des autres gaz déjà présents, et encore de l'évolution future des "puits" qui épurent le gaz de l'atmosphère !

Cela est bien évidemment impossible (ou tout du moins pas avec des formules explicites). Toutefois, pour imparfaite qu'elle puisse être, une comparaison approximative reste bien préférable à pas de comparaison du tout pour guider l'action.

Une fois terminée cette grande dissertation sur leur élaboration imparfaite, voici les PRG relatifs des 6 gaz ou familles de gaz (les Perfluorocarbures et Hydrofluorocarbures sont des [halocarbures](#) particuliers) visés par le [protocole de Kyoto](#) :

Gaz	Formule	PRG relatif / CO2 (à 100 ans)
Gaz carbonique	CO2	1
Méthane	CH4	25
Protoxyde d'azote	N2O	298
Perfluorocarbures	CnF2n+2	7400 à 12200
Hydrofluorocarbures	CnHmFp	120 à 14800
Hexafluorure de soufre	SF6	22800

Source : [GIEC](#), 4è rapport d'évaluation, 2007

Ce que signifie le tableau ci-dessus, c'est donc que si on met 1 kg de méthane dans l'atmosphère aujourd'hui, on produira le même effet, sur le siècle, que si on émet 25 kg de gaz carbonique au même moment. On pourrait résumer en disant qu'un kg de méthane "fait" 25 fois l'effet de serre cumulé sur un siècle d'un kg de gaz carbonique, ou encore que le méthane est un gaz 25 fois plus puissant que le gaz carbonique pour l'effet de serre.

Si on met 1 kg d'hexafluorure de soufre dans l'atmosphère, on "fait" 22.800 fois plus d'effet de serre cumulé sur un siècle que si on met un kg de gaz carbonique : pour l'effet de serre un kg de ce gaz "vaut" 22,8 tonnes de CO2, c'est à dire plus que l'émission annuelle de 3 Français ! Heureusement nous en émettons de toutes petites quantités pour le moment (voir plus loin). Le PRG est donc tout simplement l'équivalent CO2 : il correspond au poids de CO2 qui produira la même perturbation du système climatique que le poids du gaz considéré.

Dans certaines circonstances, plutôt que de mesurer le poids de gaz carbonique, les physiciens - et souvent les ingénieurs - ont pris l'habitude d'utiliser **l'équivalent carbone**. A ce moment là, plutôt que de comparer au poids de CO₂ émis, on compare au seul poids du carbone contenu dans le CO₂ émis.

Par définition, un kg de CO₂ vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone, c'est à dire le poids du carbone seul dans le composé "gaz carbonique".

Pour les autres gaz, l'équivalent carbone vaut :

équivalent carbone = PRG relatif x 0,2727

Cela peut sembler très compliqué, mais c'est au contraire très simple. En effet, cette convention permet de savoir sans calcul combien d'équivalent carbone nous obtiendrons dans le CO₂ résultant de la combustion d'un hydrocarbure donné. Il suffit de mesurer le poids de carbone par kg d'hydrocarbure brûlé, et cela donnera l'équivalent carbone du CO₂ émis (l'hydrogène donne de l'eau, qui ne compte pas, comme expliqué au début de cette page). Simple, dis-je !

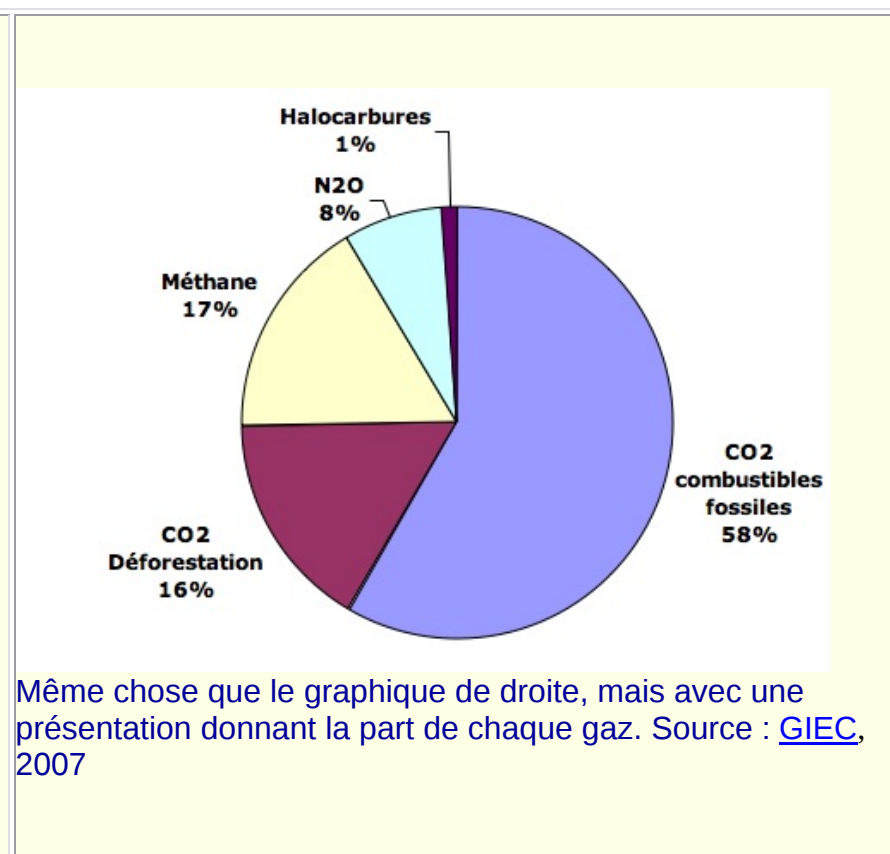
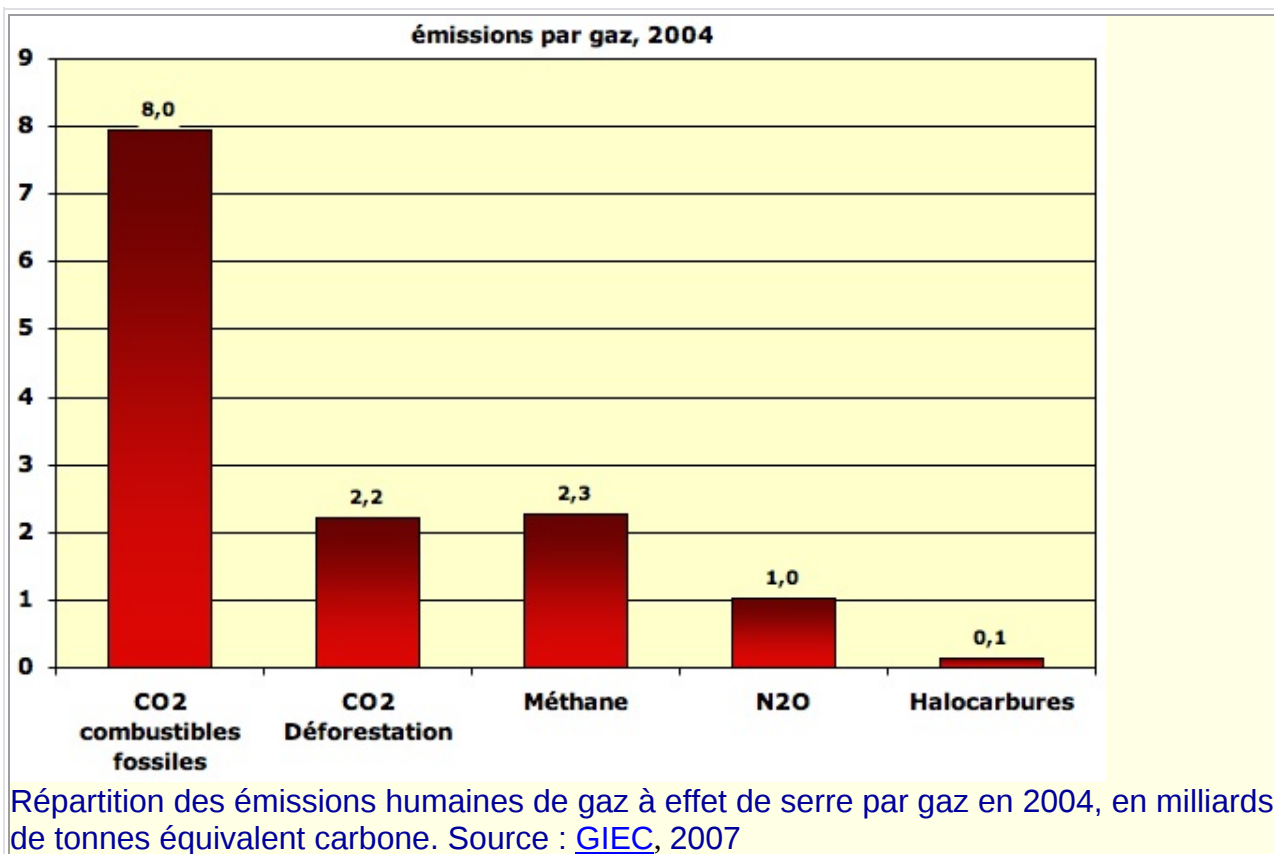
Pour les principaux gaz à effet de serre, par exemple, les équivalents carbone sont les suivants.

Gaz	Formule	équivalent carbone par kg émis
Gaz carbonique	CO ₂	0,273
Méthane	CH ₄	6,82
Protoxyde d'azote	N ₂ O	81,3
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	2.015 à 3.330
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	34 à 4.040
Hexafluorure de soufre	SF ₆	6.220

La "[taxe carbone](#)", [envisagée par votre serviteur](#) pour décourager l'émission de gaz à effet de serre, utiliserait l'équivalent carbone pour fixer le niveau de la taxe selon les gaz. Si la tonne équivalent carbone vaut 1.000 euros, alors l'émission d'une tonne de gaz

carbonique sera taxée 273 euros, l'émission d'une tonne de méthane 6.820 euros, l'émission d'une tonne de protoxyde d'azote 81.300 euros, etc.

Une fois que nous avons une base de comparaison des gaz à effet de serre (sinon ce n'est pas possible !), nous pouvons alors donner une répartition par gaz des émissions humaines, qui se présente comme suit, hors ozone (qui, comme expliqué plus haut, n'a pas d'émissions directes) :



Les aérosols

Outre les gaz à effet de serre, l'homme émet aussi des aérosols et des "précurseurs d'aérosols".

Un **aérosol** est une suspension dans l'air de gouttelettes ou de poussières. Nous en voyons tous les jours un exemple : les nuages. Mais un "nuage de poussière" rentre aussi dans cette catégorie : quand nous passons le balai un peu énergiquement, nous provoquons un aérosol.

Les émissions d'aérosols comprennent par exemple :

- les particules fines émises lors de la combustion de pétrole ou de charbon (les fameuses fumées noires d'une voiture diesel, par exemple),
- les particules fines émises lors de l'utilisation du bois comme combustible (ce qui représente 10% de la consommation d'énergie à la surface de la planète, en ordre de grandeur),
- la poussière directement soulevée par la circulation routière, ou l'exploitation de carrières...

Un **précurseur est quelque chose qui précède** : les précurseurs d'aérosols sont donc des substances gazeuses qui, par suite de diverses transformations physiques ou chimiques, peuvent conduire à la formation d'aérosols.

Les émissions de précurseurs d'aérosols regroupent :

- les émissions de dioxyde de soufre (SO_2), qui est un polluant local bien connu provoqué par la combustion de n'importe quel produit contenant du soufre, et notamment le charbon et le pétrole (qui contiennent toujours du soufre à l'état brut). Ce dioxyde de soufre se transforme ensuite en petites particules de sulfate (SO_4), solides.

➤ à un degré moindre, les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), essentiellement en provenance de l'agriculture, qui conduiront à la formation de particules solides de nitrates.

Les aérosols ont deux effets :

➤ ils réfléchissent ou absorbent la lumière, selon la couleur des particules qui les composent,

➤ leurs particules fournissent des "noyaux de condensation", ce qui signifie qu'ils favorisent la condensation de la vapeur d'eau de l'atmosphère en petites gouttes, ce qui conduit à des modifications dans la formation des nuages. Ces derniers sont, comme nous l'avons vu, des aérosols d'un genre particulier, et qui en plus interviennent de 2 manières opposées en ce qui concerne le changement climatique.

Que font les nuages ?

➤ composés d'eau, ils contribuent à l'[effet de serre](#) (voir plus haut),

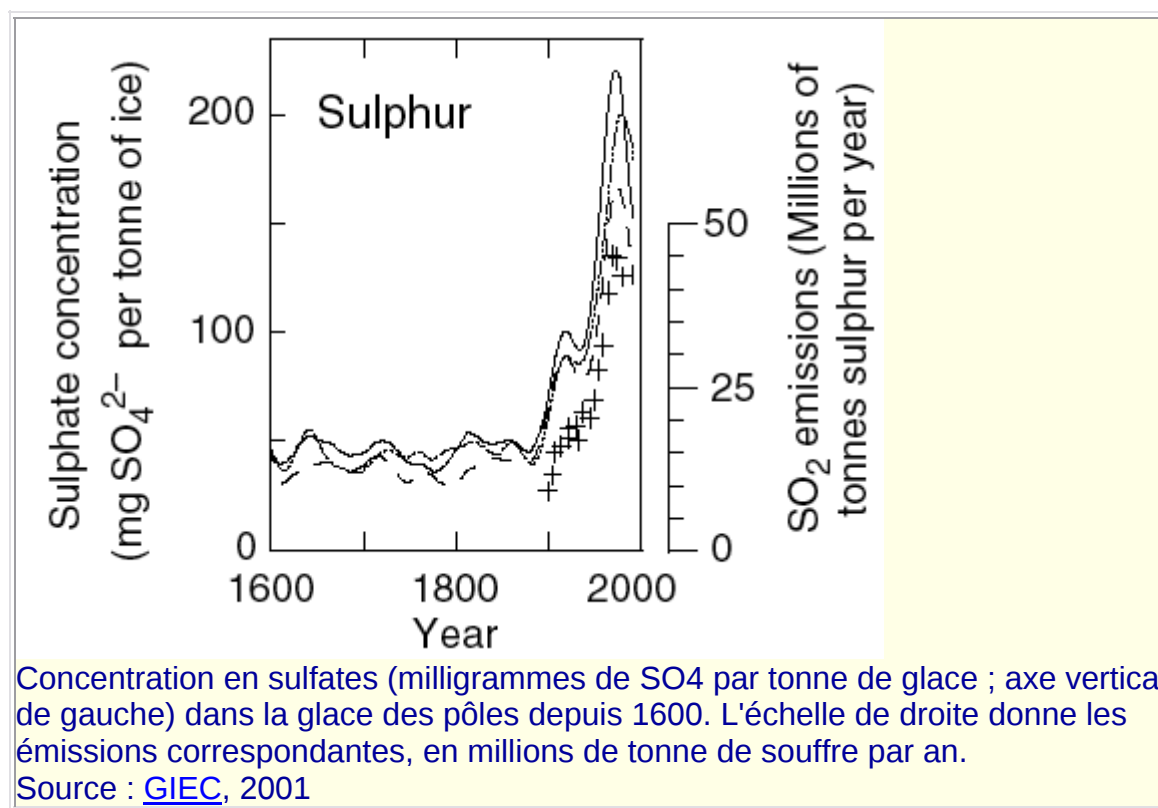
➤ mais par contre, en empêchant la lumière de passer (la lumière est plus facilement réfléchie vers l'espace par un nuage que par un ciel clair) ils ont un effet "refroidissant" sur la surface.

Il se trouve que le bilan précis de ces deux effets antagonistes a une influence déterminante sur l'[élévation de température que notre planète connaîtra au 21^e siècle](#), et une représentation précise des nuages dans les [modèles climatiques](#) reste clairement un sujet avec des marges de progrès importantes.

Il est toutefois déjà établi que c'est l'effet de serre qui l'emporte sur l'effet de réflexion pour les nuages hauts (cirrus), lesquels sont suffisamment translucides pour laisser passer la lumière en quantités significatives, mais sont déjà relativement opaques aux infrarouges émis par la terre, alors que c'est l'effet de réflexion qui l'emporte sur l'effet de serre pour les nuages bas (cumulus, stratus...) qui ont donc globalement un effet refroidissant sur le climat.

Comme le SO₂ a tendance à favoriser la formation de nuages bas, outre que les particules de sulfate qu'il engendre ont elles aussi un effet réfléchissant de manière directe, ce gaz est donc considéré comme un "refroidisseur du climat". Cela étant, il est aussi

responsable des fameuses pluies acides, qui ont des effets négatifs sur les sols et la végétation, et nos poumons ne l'apprécient guère. Il est difficilement concevable d'en émettre beaucoup pour combattre l'effet de serre ! En fait la majorité des politiques publiques d'environnement visent des diminutions importantes en ce qui concerne les émissions de ce gaz, avec des résultats significatifs comme on peut en retrouver la trace... dans les glaces polaires.



Mais, comme pour les gaz à effet de serre, la nature sait aussi émettre des aérosols, notamment à travers le volcanisme. Par exemple l'éruption du volcan Pinatubo, qui a envoyé dans la haute atmosphère plusieurs km³ de matière sous forme de poussière, poussière qui y est resté assez longtemps, a provoqué une baisse mesurable des températures mondiales (0,1 - 0,2 °C) pendant quelques années (qui est en fait plutôt un arrêt momentané de la hausse due à l'effet de serre !).

En bref, les aérosols ont des effets directs sur le rayonnement, et indirects en favorisant des nuages qui peuvent être hauts ou bas. Leur contribution, globalement "refroidissante", est encore un sujet d'étude scientifique intense.

Gaz à effet de serre contre aérosols : qui gagne ?

Une partie de l'impact des gaz à effet de serre que nous accumulons dans l'atmosphère est donc compensée par l'effet des aérosols et des précurseurs d'aérosols que nous mettons aussi dans l'atmosphère.

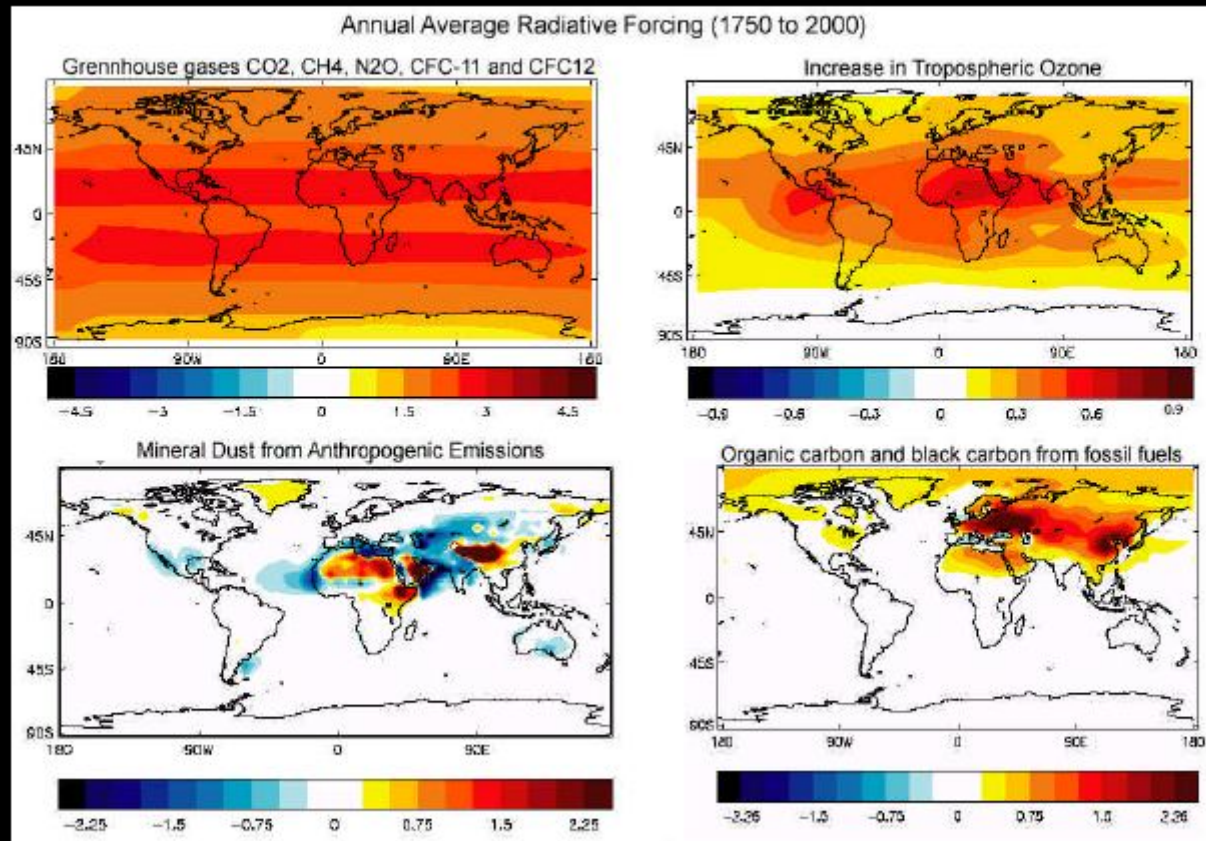
Toutefois les effets des divers gaz (effet de serre supplémentaire, réchauffant, ou effet "refroidissant des aérosols) ne sont pas identiques en tout point de la planète.

Le graphique ci-dessous représente la distribution géographique de l'effet de serre supplémentaire engendré par :

- les gaz autres que l'ozone (à gauche),
- l'ozone près du sol (à droite),
- les aérosols de type "suies" (à droite), et de type "poussières", à gauche.

Les couleurs rouges correspondent à un effet de réchauffement, les bleues à un effet de refroidissement.

Distribution géographique des forçages radiatifs (1750 à 2000)



IPCC [2001]

Source : [GIEC](#), 2001

Mais les aérosols ont une caractéristique importante qui fait que leurs effets ne perdurent pas très longtemps après leur émission : leur durée de vie dans l'atmosphère est de quelques semaines seulement (un nuage finit par provoquer de la pluie : il ne reste pas des années en l'air ; les poussières retombent à la surface de la Terre, tout comme la poussière "envoyée en l'air" par notre balai retombera assez vite sur le plancher - et les meubles). Ils ne s'accumulent donc pas dans l'atmosphère, à la différence des gaz à effet de serre.

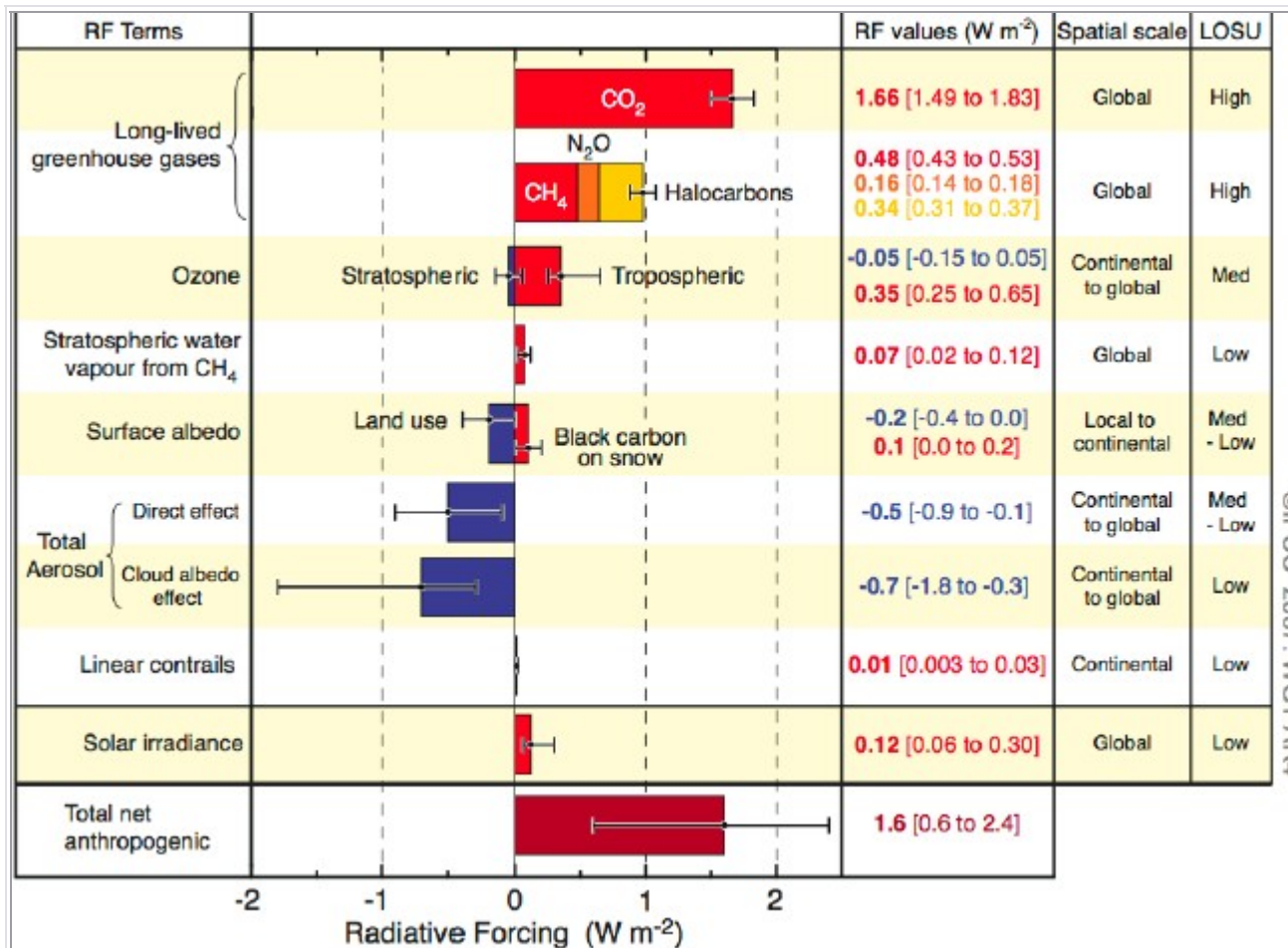
Les scientifiques sont donc certains du fait que les aérosols ne peuvent compenser l'effet des gaz à effet de serre sur le long terme.

Par ailleurs, la durée de brassage de l'atmosphère (c'est-à-dire le temps qu'il faut pour qu'une partie d'un gaz émis en Australie se retrouve au-dessus de New-York) étant de quelques mois seulement (une année tout au plus), les lieux d'émission des gaz à effet de serre sont sans importance. Cela explique pourquoi des [négociations internationales](#) sont inévitables pour parvenir à stopper [l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère](#).

Cette indifférence au lieu d'émission ne concerne pas les aérosols qui influent plus particulièrement au-dessus des zones où ils sont émis (le nuage au-dessus de New-York n'empêche pas les habitants de Sydney d'avoir chaud, et la pollution locale au soufre à côté de Pékin est sans incidence sur la formation d'aérosols soufrés à Rio de Janeiro).

Malgré ce côté local des aérosols et global de l'effet de serre, il est néanmoins possible de faire un "bilan global" des contributions des uns et des autres sur l'évolution du climat planétaire, ce qui donne alors le graphique ci-dessous.

Le graphique ci-dessous compare les uns aux autres les différentes composantes - positives ou négatives - qui jouent sur les échanges d'énergie entre la Terre et l'espace (en Watts par mètre carré). RF signifie "forçage radiatif", c'est-à-dire le supplément - ou le déficit - de rayonnement reçu par la terre du fait de la présence de la substance émise. Seule la contribution humaine est prise en compte, sauf pour la variation d'insolation ("solar irradiance").



De haut en bas on trouve respectivement :

- les contributions des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O , halocarbures, voir plus haut),
- les contributions de l'ozone stratosphérique (celui de la fameuse "couche", qui n'en est pas une !) et de l'ozone

troposphérique (celui des "pics de pollution")

- la contribution du supplément de vapeur d'eau dans la stratosphère provenant des émissions humaines de méthane,
- les conséquences du changement d'albedo découlant du changement d'usage des sols (l'albedo est ce qui sert à mesurer le pouvoir de réflexion d'une surface : l'albedo d'un miroir est proche de 1 - toute lumière reçue est réfléchie - et celui d'un corps noir est proche de zéro - toute lumière reçue est absorbée). Par exemple, quand on déforeste, l'albedo augmente, car une forêt absorbe généralement plus de rayonnement que des cultures ou un sol nu. La même colonne donne aussi la contribution des dépôts de suie sur la neige,
- les contributions des différents aérosols (voir plus haut),
- les contributions de la vapeur d'eau contenue dans les trainées des avions (il ne s'agit donc pas des émissions directes de CO₂ sortant des réacteurs)
- Bien que cela ne soit pas un effet dû à l'homme (mais le climat a aussi des facteurs naturels de variabilité, et pas qu'un seul!), la contribution des variations d'activité du soleil.

Pour toutes ces contributions, la droite du rectangle donne la valeur la plus probable, et le tiret la zone d'incertitude (ces valeurs sont reprises dans la colonne "RF values", RF signifiant Radiative Forcing). Lorsque le tiret est très grand par rapport au rectangle, cela signifie que l'on n'a qu'une vague idée de la valeur.

Les deux dernières colonnes donnent :

- l'échelle spatiale de l'effet (de global à local)
- Le niveau de compréhension des processus à l'oeuvre - et donc le degré de confiance dans l'estimation - de high, pour élevé, à low, pour faible (LOSU signifie Level Of Scientific Understanding).

Source : GIEC, Summary for Policymakers of the 4th assessment report, 2007

Peut-on dire que le CO₂ est un poison ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Qu'est-ce qu'un poison ?

Hachette nous dit : ***poison n. m. 1. Toute substance qui, introduite dans un organisme vivant, peut le tuer ou altérer ses fonctions vitales.***

Certes le climat n'est pas un organisme vivant (!), même si un [livre très intéressant](#) explique que, "vue de mars", il est tentant de considérer la Terre comme un être vivant, compte tenu du nombre de fonctions homéostatiques (c'est à dire auto-régulatrices) qu'elle comporte. Mais le CO₂ que nous introduisons actuellement dans l'atmosphère peut "tuer", ou du moins "altérer" les fonctions vitales du climat (qui sont de créer une biosphère favorable à notre vie).

Il est donc parfaitement légitime de dire que les émissions d'origine humaine de gaz à effet de serre constituent un poison, y compris le CO₂. Cela devrait notamment inciter à ne pas considérer comme non polluants les procédés qui n'émettent "que" du CO₂, et par exemple :

- les voitures catalysées,
- l'utilisation du [gaz naturel](#),
- la [pile à combustible](#) utilisée avec des hydrocarbures,
- etc...

Les émissions humaines de gaz à effet de serre ont-elles vraiment changé quoi que ce soit ?

dernière version : août 2007

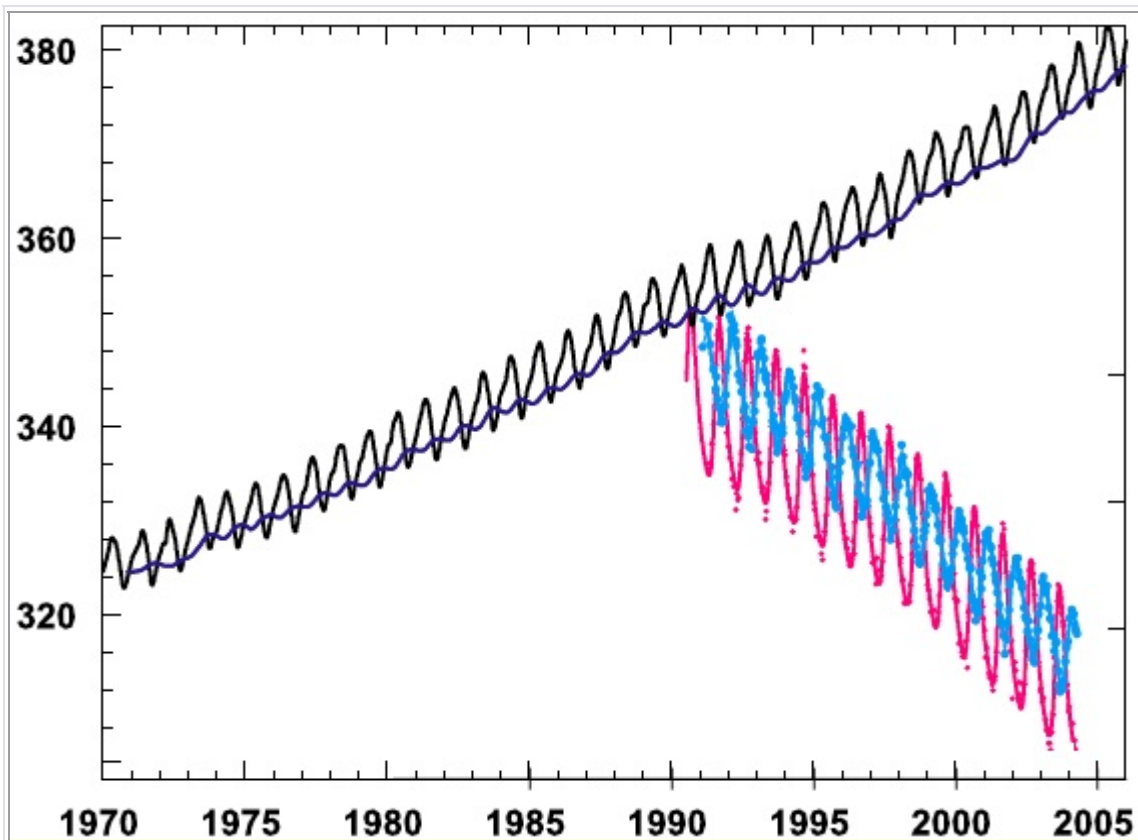
site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Un certain nombre de gaz à effet de serre sont, et cela est fort bien connu, présents de longue date dans l'atmosphère. Le CO₂, par exemple, cela fait quelques milliards d'années qu'il y en a autour de la terre ! De même, du méthane est émis par les zones humides depuis que des bactéries anaérobies y vivent, et cela doit bien remonter à une paire de centaines de millions d'années. Dès lors, qu'est-ce qui permet de dire que l'homme est bien pour quelque chose dans l'augmentation - non contestée, elle - qui est actuellement observée ? Dans cette affaire, les [scientifiques](#) travaillent comme un (bon) magistrat : ils se basent sur "un faisceau d'indices concordants", en éliminant progressivement toute cause qui ne peut expliquer ce qui est observé.

Même sur une courte période, la concentration en CO₂ augmente rapidement

Depuis la fin des années 50, 1957 pour être exact, des mesures systématiques de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère ont pris place en divers endroits du globe, le premier d'entre eux et encore aujourd'hui le plus célèbre étant Manau Loa, sur l'île d'Hawaï. Pourquoi diantre être allé se mettre là-bas, si ce n'est pour faire du surf ? Tout simplement pour être sûr de ne pas être perturbé par une grosse source d'émission de CO₂ telle qu'une ville, une région fortement industrialisée, etc. Les observatoires qui sont venus s'ajouter à Manau Loa sont également situés sur des îles perdues au milieu de l'océan (la France possède ainsi une station de mesure sur l'Île d'Amsterdam) ou sur des bateaux.

Depuis le début de ces mesures, les relevés ont montré que la concentration en gaz carbonique dans l'air augmentait un peu chaque année, et récemment d'autres mesures ont permis de voir que la quantité d'oxygène présente dans l'air diminuait de manière remarquablement symétrique (rassurez vous, ça concerne des millièmes, il en restera bien assez !). Pour une molécule de CO₂ apparaissant dans l'atmosphère, il disparaît une molécule d'O₂, ce qui accrédite très fortement l'idée que le CO₂ injecté provient d'une combustion.



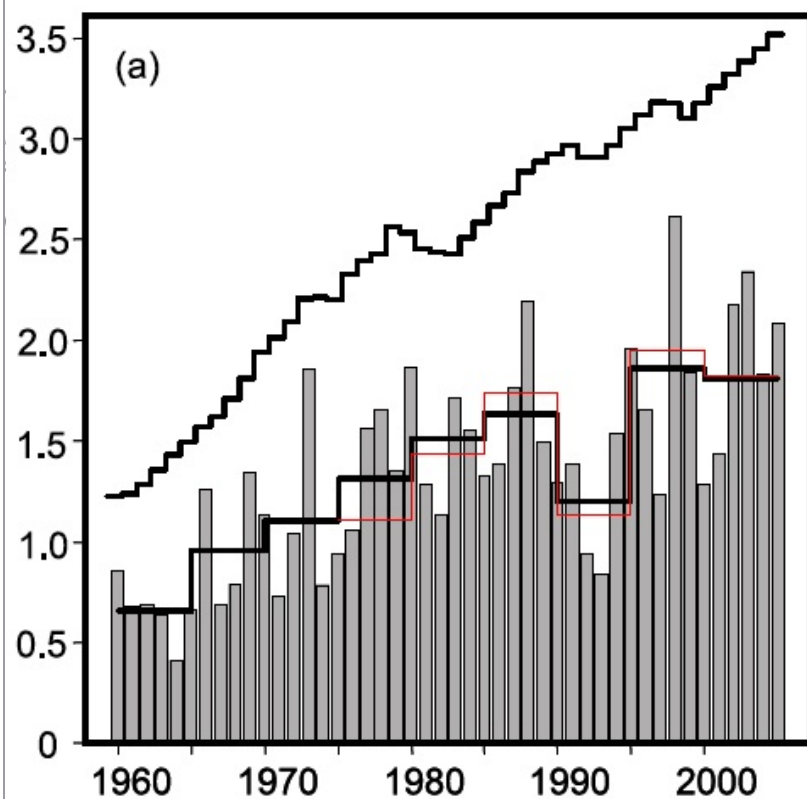
La courbe noire du haut représente la variation de la teneur atmosphérique en CO₂ mesurée en parties par million à Mauna Loa, Hawaï (1 partie par million = 0,0001% du volume de l'atmosphère; ppm ou ppmv en abrégé), et la courbe bleu très foncé du haut ("imbriquée" dans la courbe noire, et évoluant au même rythme, mais avec une amplitude moindre) représente la même chose, mesurée à Baring Head, New Zealand. La moindre amplitude de la mesure à Baring Head vient de ce que l'essentiel de la biomasse continentale se trouve dans l'hémisphère Nord, où elle engendre une variation de la teneur atmosphérique en CO₂ au fil des saisons.

En gros, au printemps et en été, en pleine période de croissance de la végétation, le flux qui domine est l'absorption du CO₂ par la végétation (d'où diminution du CO₂ atmosphérique), alors qu'en automne et hiver le flux qui domine est celui de la décomposition des végétaux morts (dont les feuilles tombées en automne) et la respiration des plantes et des micro-organismes. Le brassage de l'air entre hémisphères ne se faisant pas en quelques mois mais plutôt en une année, cette amplitude annuelle due au cycle saisonnier de la végétation de l'hémisphère Nord ne se répercute pas sur les deux hémisphères de manière homogène. Au niveau de la moyenne annuelle, la différence entre les deux hémisphères est minime, et de toute façon la tendance est exactement la même : l'évolution annuelle est très nettement à la hausse, jusqu'à arriver à 380 parties par million de CO₂ en 2006 en moyenne annuelle.

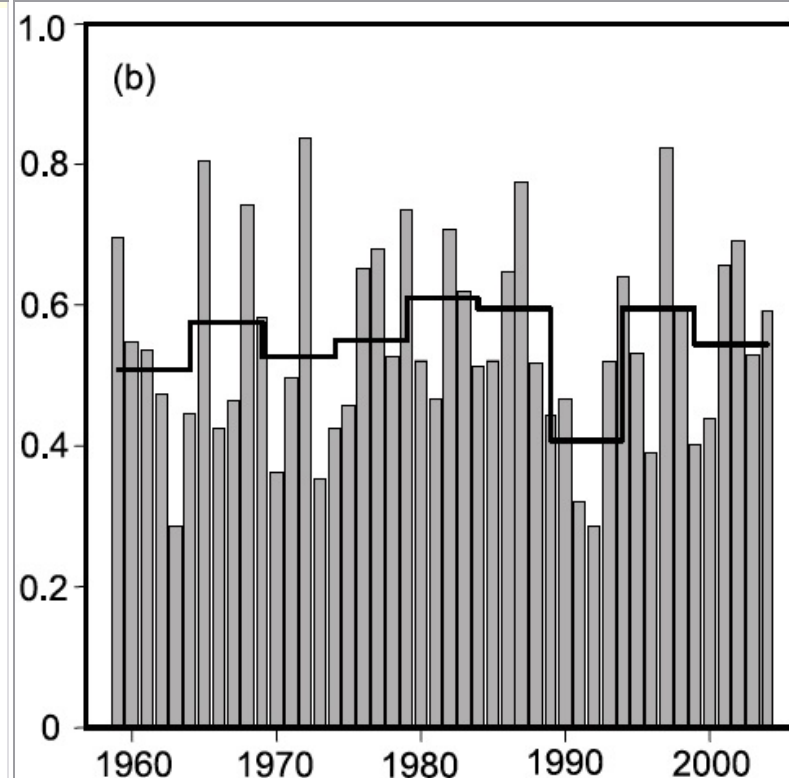
Les courbes bleue et rose du bas représentent la variation de la teneur atmosphérique en oxygène, ou plus exactement l'écart à la normale, en ppm aussi. La courbe rose vient de mesures effectuées à Alert, Canada (82°N) et la courbe bleu clair de mesures effectuées à Cape Grim, Australie (41°S). La corrélation avec la courbe du CO₂ est spectaculaire.

Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007

Un deuxième indice intéressant est que non seulement le CO₂ atmosphérique augmente, mais il augmente chaque année un peu plus (graphique ci-dessous), exactement comme la combustion des hydrocarbures. Il y a donc une "accélération" de l'augmentation très perceptible sur une échelle de temps - quelques dizaines d'années - qui est ridiculement courte à l'échelle des cycles naturels.



Les barres grises représentent l'augmentation annuelle du CO_2 atmosphérique - en ppm - provenant des mesures de la Scripps Institution of Oceanography, qui montre clairement que cette augmentation est plus importante chaque année. L'atmosphère s'enrichissait ainsi de 0,5 partie par million de CO_2 tous les ans vers 1960, alors qu'actuellement c'est autour de 2 ppm par an (4 fois plus). Les courbes en escalier noire et rouge juste au-dessus des barres donnent la moyenne glissante sur 5 ans des



Part du CO_2 émis chaque année qui reste dans l'atmosphère (0 = 0%, 1 = 100%).

Il est facile de constater que cette fraction reste relativement stable autour de 50%, avec une anomalie au début de la décennie 1990, alors que les émissions de CO_2 ont quadruplé entre 1960 et 2005. Cela s'explique par le renforcement des puits, qui pourrait cependant ne pas durer.

valeurs des barres et celle provenant des observations de la NOAA.

La courbe noire du haut (en escalier) représente (en parties par million) l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO₂ que nous aurions eue de 1960 à 2005 si la totalité du CO₂ émis au titre des combustibles fossiles restait dans l'atmosphère. La différence avec ce qui est vraiment mesuré correspond à la reprise par les [puits](#).

Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007

Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007

La mesure des gaz à effet de serre sur une longue période

Sur le passé très récent, l'affaire est entendue : le CO₂ atmosphérique augmente, augmente même de plus en plus, et il augmente (et l'oxygène diminue) au rythme de la combustion du pétrole, du gaz et du charbon. C'est déjà un sérieux indice, mais pour pouvoir dire avec certitude si la civilisation industrielle y est pour quelque chose ou pas, il faut pouvoir se faire une idée de ce qui se passait avant son début, c'est à dire avant 1750. Or avant 1750 (et même quelques temps après !) il n'y n'avait pas d'instruments permettant de mesurer directement la teneur en CO₂ dans l'air, pas plus que la teneur en méthane ou en quoi que ce soit d'autre. Comme aucun de nos lointains ancêtres n'a eu la bonne idée de nous mettre quelques bouteilles d'air de l'époque de coté, comment a-t-on procédé ?

Nous avons la chance d'avoir, au pôle Sud, un dispositif naturel d'archivage de la composition de l'air. Chaque année, il y tombe de la neige, et comme la température de l'Antarctique est très basse et qu'il ne dégèle jamais, chaque année voit de nouvelles chutes de neige qui viennent recouvrir les précédentes. Avec le poids de la neige qui s'accumule au fil des années sans jamais fondre, la neige la plus ancienne finit par se transformer en glace, sous l'effet de la pression, comme cela se passe avec les glaciers de nos Alpes. Au cours de cette transformation de neige en glace, qui dure quelques siècles en général, l'air qui entoure

les flocons de neige se retrouve emprisonné dans la glace, sous forme de petites bulles. Ces bulles datent donc de l'époque où la neige est tombée, à quelques siècles près.

Le résultat de tout cela est que la calotte glaciaire de l'Antarctique se compose de glace qui est de plus en plus vieille au fur et à mesure que l'on creuse plus profond, et que, avec chaque couche de glace d'un âge donné, on trouve un peu d'air - sous forme de micro-bulles - qui date de la même époque que la glace.

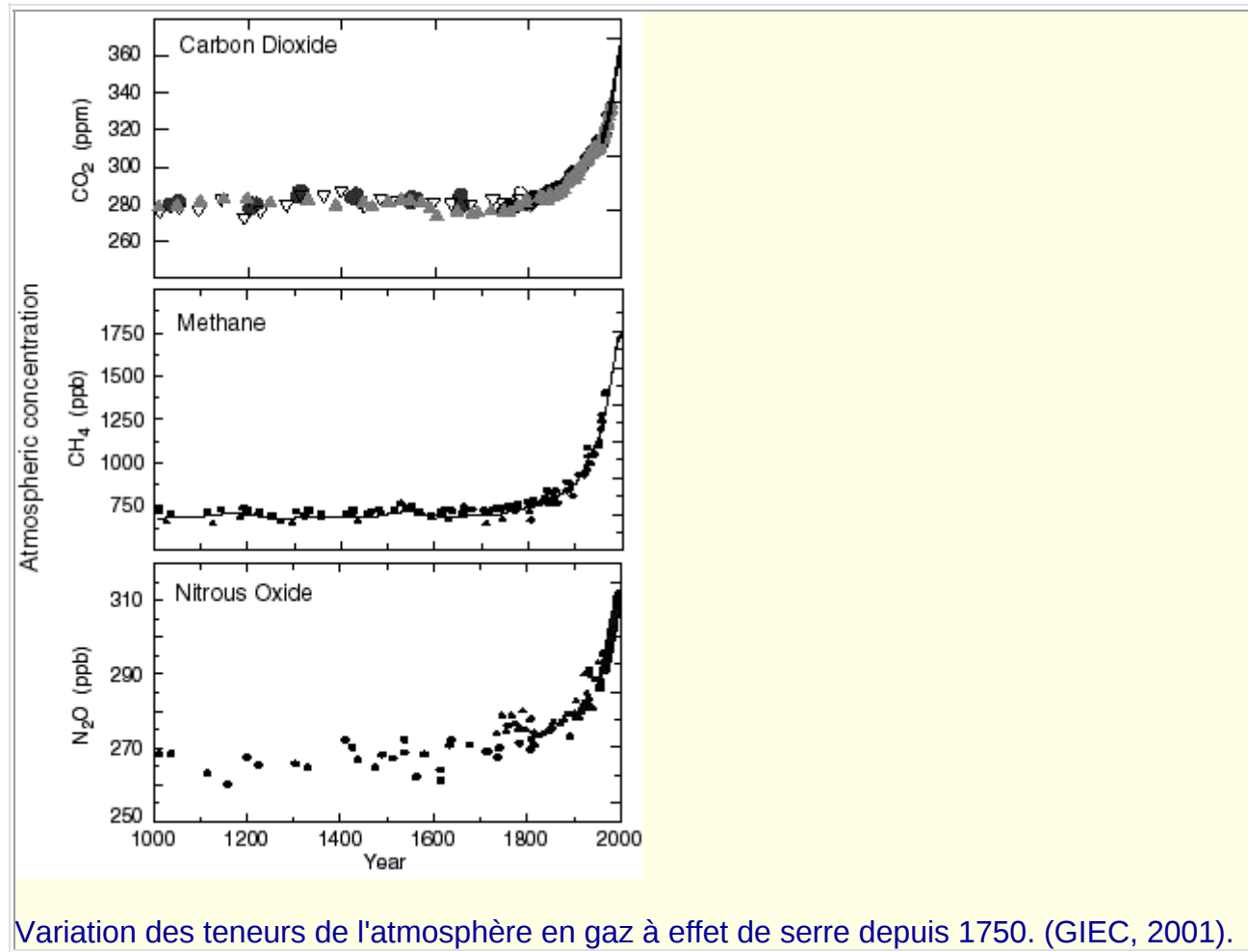
Cette situation ouvre la voie à une possibilité extraordinaire : retracer la composition de l'atmosphère, pour les gaz chimiquement stables une fois emprisonnés dans la glace (le CO₂ en fait partie), jusqu'à l'époque de formation de la glace la plus ancienne de l'Antarctique. Pour cela, il faut :

- creuser et extraire proprement (sans la contaminer avec de l'air ambiant) ce que l'on appelle une "carotte" dans la glace, c'est à dire un grand cylindre de quelques dizaines de centimètres de diamètre et dont la longueur est de quelques kilomètres (de la surface jusqu'au rocher),
- dater la glace tout le long de la carotte,
- analyser la composition des bulles d'air qui s'y trouvent (aussi tout le long), et notamment les concentrations des principaux gaz à effets de serre "naturels" (c'est à dire gaz carbonique, méthane, protoxyde d'azote).

Les couches les plus profondes de l'Antarctique datant d'il y a 800.000 ans, on comprend que l'on peut avoir un bon aperçu - d'autant plus précis que l'on est proche de notre époque, il est vrai - sur ce qui s'est passé pendant cette période. Pour être exact, on peut avoir une représentation très précise de ce qui s'est passé pendant les 100.000 dernières années, puis une idée encore très acceptable (c'est à dire encore exploitable) de ce qui s'est passé sur les 700.000 années d'avant (de -100.000 à -800.000 ans).

Les constatations

Si l'on fait la courbe des concentrations dans l'air de gaz à effet de serre "naturels" depuis 1750 (début de l'industrialisation) (graphique ci-dessous), on constate que ces concentrations suivent tous une courbe en très forte croissance (à peu près exponentielle) depuis cette date.



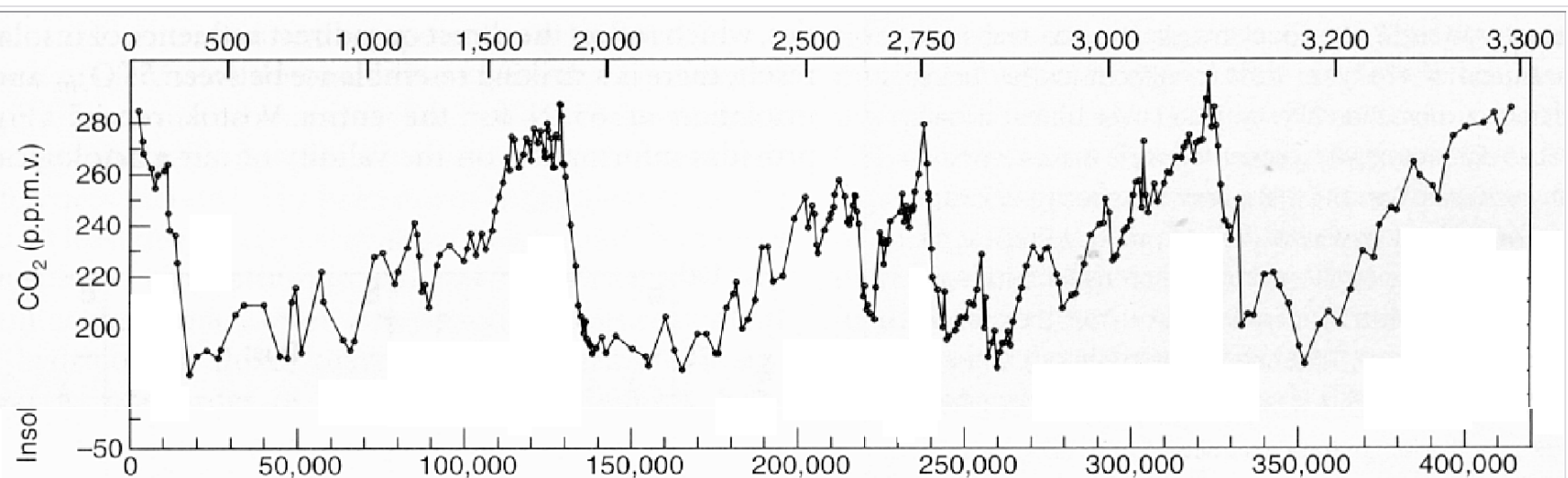
Nitrous Oxide signifie protoxyde d'azote, et carbon dioxide signifie CO₂.

Les résultats proviennent de l'analyse des bulles d'air mesurées dans la glace (Blunier et al., 1993 ; Etheridge et al., 1996) et, pour les années postérieures à 1958, de mesures directes.

Rappel : un ppmv signifie une partie par million, c'est à dire 0,0001% ; un ppbv = une partie par billion (en Anglais, un billion = un milliard), c'est à dire 0,0000001% : mille fois moins ! On voit que les gaz à effet de serre n'ont pas besoin d'être présents en grande quantité pour avoir un effet déterminant.

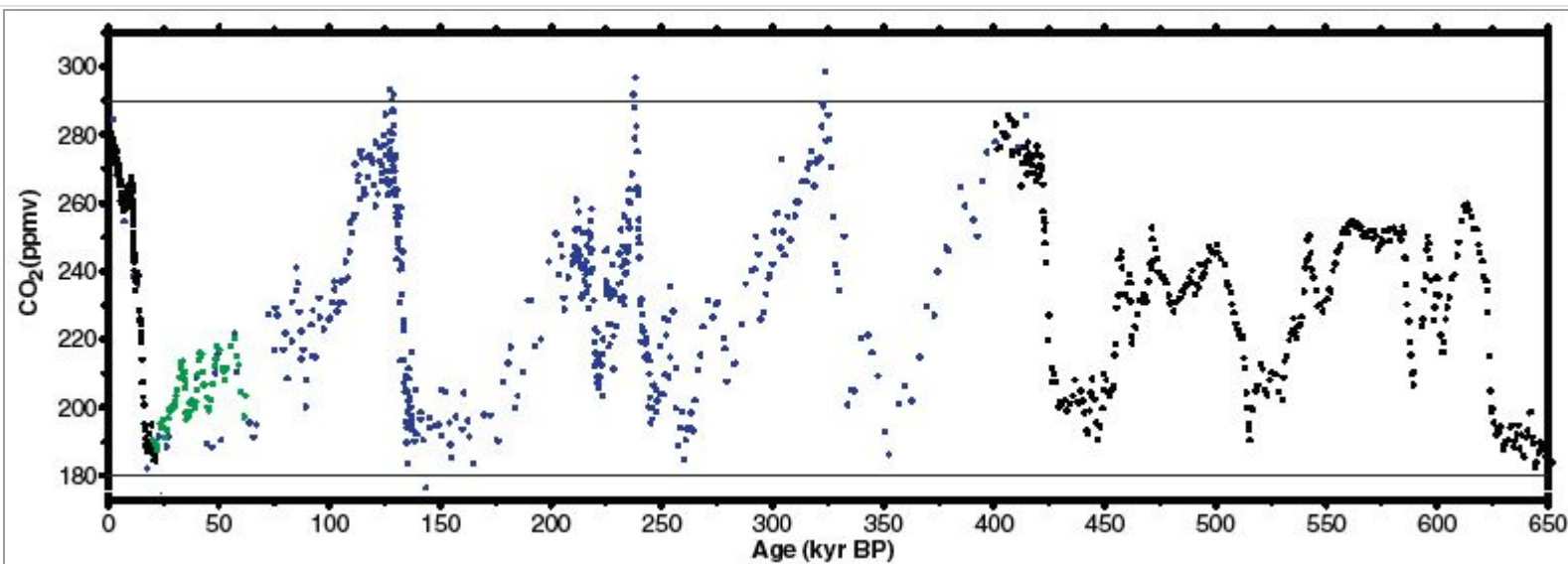
Graphique tiré de GIEC, 2001

Par ailleurs, aux incertitudes de mesure près, les concentrations de CO₂ avant 1750 sont constantes sur plus de dix mille ans, et n'ont jamais dépassé la valeur de 1750 (280 ppmv, alors qu'en 2005 nous sommes déjà à 380) pendant les 650.000 ans qui ont précédé 1750.



Variation des teneurs de l'atmosphère en gaz carbonique sur 400.000 ans tirée du forage de Vostok. Petit & al, Nature, Juin 1999

L'échelle de gauche donne les concentrations, celle du bas l'âge en années (attention ! plus on va vers la droite et plus on remonte dans le passé), et celle du haut la profondeur du carottage (en mètre). On constate aisément que la concentration en CO₂ n'a pas dépassé 280 ppmv depuis -400.000 ans.



Variation des teneurs de l'atmosphère en gaz carbonique sur 650.000 ans (attention ! on va vers le passé quand on se déplace sur la droite) tirée du forage EPICA. On constate aisément que de -400.000 ans à -650.000 ans le CO₂ n'a pas varié différemment que pendant les 400.000 ans qui ont suivi.

Siegenthaler, Stocker et al., Science, 2005

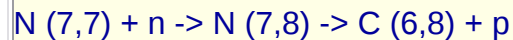
Si avec tout cela nous ne sommes pas encore coupables, du moins commençons-nous à être fortement suspects. Ce qui va achever de nous confondre, c'est l'analyse isotopique du carbone contenu dans le gaz carbonique atmosphérique.

L'atome de carbone possède trois isotopes :

- le carbone 12, le plus abondant, possède 6 protons et 6 neutrons.
- Le carbone 13, qui possède 6 protons et 7 neutrons, est un isotope stable (il n'est pas radioactif) et présent à hauteur de 1% du carbone environ, avec toutefois une différence

notable entre les milieux océaniques et les milieux continentaux : il est moins abondant dans les milieux continentaux (dans la biomasse et...les combustibles fossiles, qui sont de la biomasse décomposée il y a longtemps) que dans l'océan,

➤ le carbone 14, qui possède 6 protons et 8 neutrons, est instable (c'est à dire radioactif, de période 5.500 ans environ, c'est à dire qu'au bout de 5.500 ans la moitié d'un stock initial de carbone 14 a disparu) se forme par bombardement, dans la haute atmosphère, de l'azote de l'air par les neutrons du rayonnement cosmique, selon la réaction



Ce carbone 14 se retrouve ensuite un peu partout, mais comme il se désintègre en quasi totalité au bout de quelques dizaines de milliers d'années, les combustibles fossiles (qui se sont formés il y a des millions d'années au moins) n'en comportent pas.

Nous avons donc des discriminants du CO₂ selon sa provenance :

➤ les émissions de CO₂ provenant de l'océan sont relativement riches en carbone 13 et comportent du carbone 14

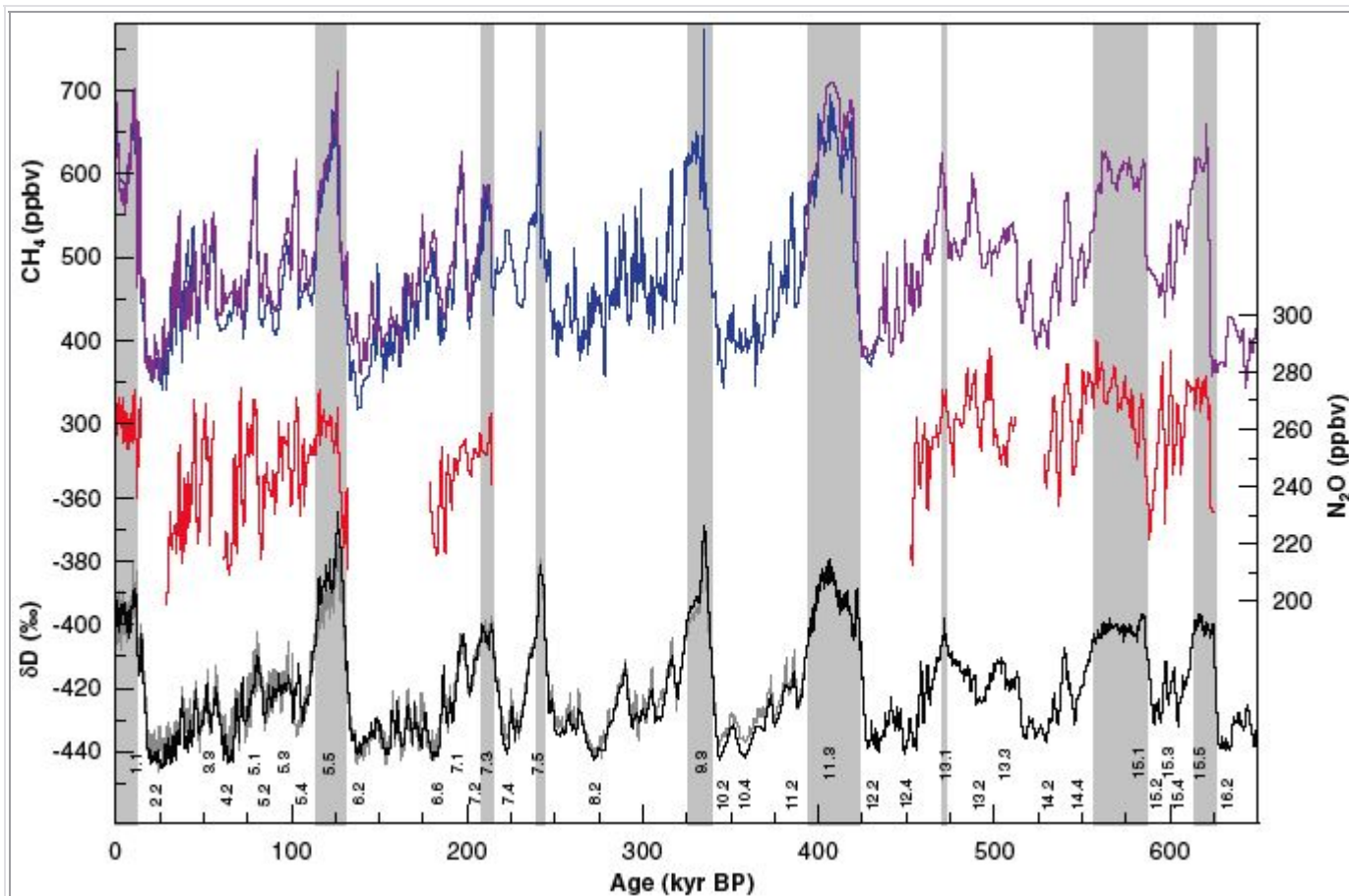
➤ les émissions de CO₂ provenant de la biomasse continentale sont moins riches en carbone 13 et comportent aussi du carbone 14

➤ les émissions de CO₂ provenant des combustibles fossiles sont aussi riches en carbone 13 que celles provenant de la biomasse continentale (charbon) ou marine (pétrole et gaz) , mais sont dépourvues de carbone 14

Or on constate que le CO₂ atmosphérique s'appauvrit actuellement en carbone 13 et en carbone 14. L'appauvrissement en carbone 13 indique que l'augmentation de ce CO₂ atmosphérique ne vient pas de l'océan, et l'appauvrissement en carbone 14 implique - puisque c'est la seule source possible - que les émissions en provenance des combustibles fossiles augmentent.

Pour le CO₂, la concentration jamais atteinte depuis 650.000 ans au moins, le rythme inconnu jusqu'alors de l'augmentation de sa concentration, et les confirmations par les analyses isotopiques et la variation anticorrélée de l'oxygène permettent d'affirmer que c'est bien l'homme et en particulier ses activités "modernes" qui est la cause de l'augmentation de ce gaz dans l'atmosphère.

Pour le méthane, le passé lointain nous offre aussi une base de comparaison qui permet d'affirmer, sans trop se tromper, que nous sommes bien en cause dans l'élévation récente. En effet, le premier graphique de la page montre que le méthane est actuellement à 1700 parties par milliard, après avoir oscillé entre 350 et 700 parties par milliard sur les 650.000 ans qui viennent de s'écouler.



Courbe pourpre et bleue du haut : évolution du méthane atmosphérique, en parties par milliard, déduit d'analyses des bulles d'air dans les carottes prélevée en Antarctique (Dome C en pourpre, Vostok en bleu). La concentration atmosphérique naturelle a oscillé entre 400 et 700 ppm sur les 700.000 ans.

La courbe rouge du milieu concerne la concentration en protoxyde d'azote, qui n'a jamais

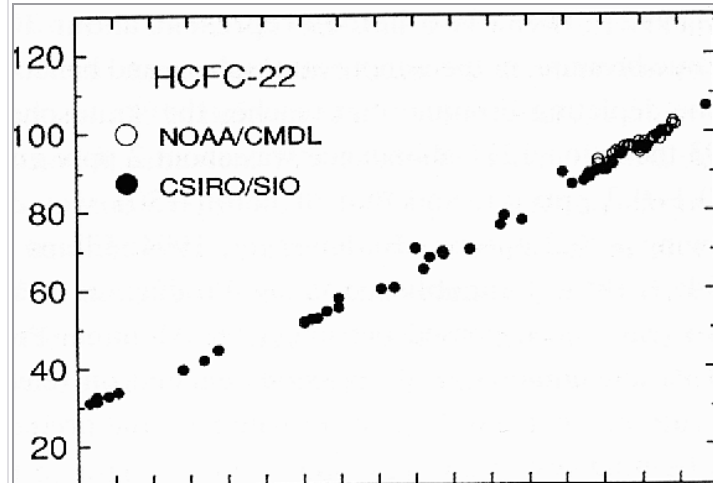
dépassé 280 ppmv avant l'ère industrielle.

Enfin la courbe du bas (en noir) donne la teneur la glace en deutérium (hydrogène avec un proton et un neutron), qui est un marqueur de la température planétaire.

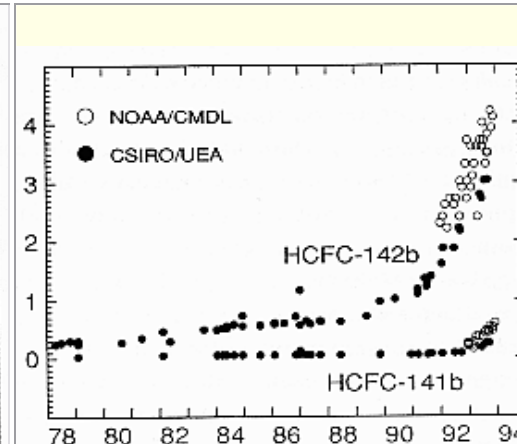
Source : Spahni, Chappellaz et al, Science, 2005

Enfin que l'augmentation nous soit imputable est de toute façon une évidence pour les gaz "industriels" qui n'étaient pas présents naturellement dans l'atmosphère ([halocarbures](#)) et dont les concentrations augmentent également de manière exponentielle (graphique ci-dessous pour certains d'entre eux ; les halocarbures comportent plusieurs dizaines de représentants dont les noms sont des sigles barbares assez peu parlants pour le profane).

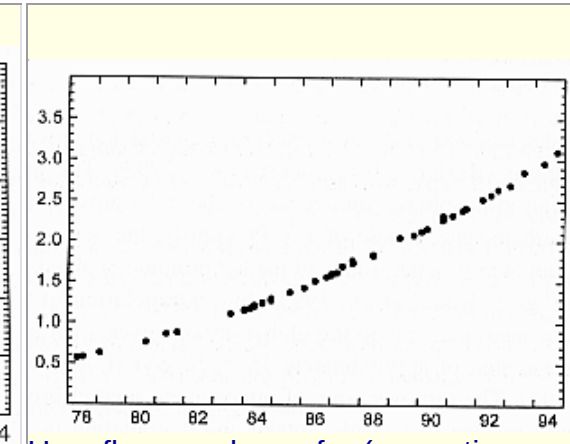
Variation des teneurs de l'atmosphère pour certains gaz à effet de serre industriels, mesurées directement dans l'air. Source : [GIEC](#), 1996



un halocarbure : HCFC-22 (en parties par trillion - une partie par trillion = 0,0000000001% !)

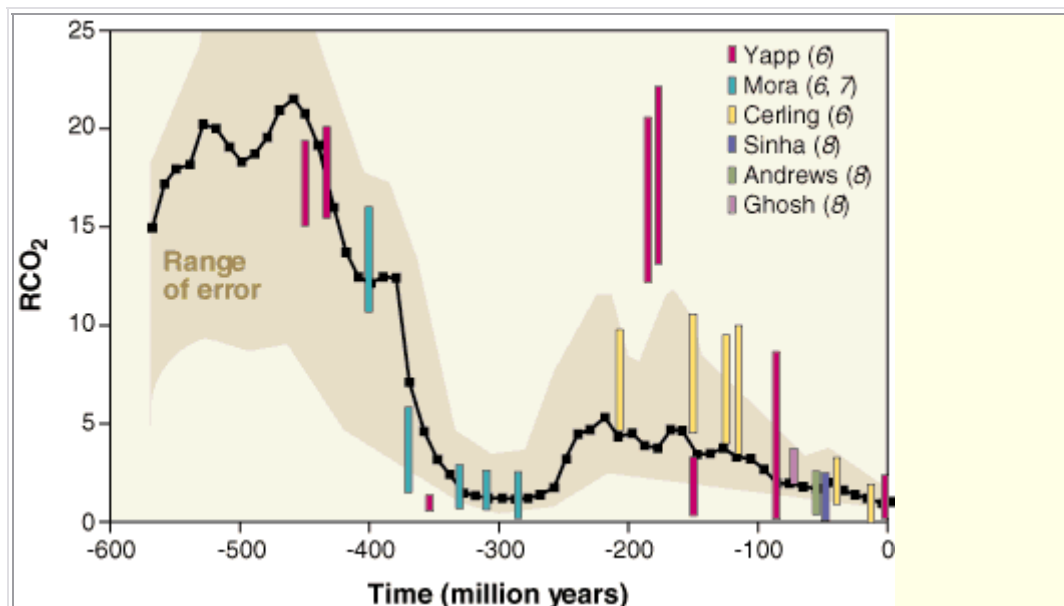


2 halocarbures : HCFC -141b et HCFC -141b (en parties par trillion)



Hexafluorure de soufre (en parties par trillion).

Par contre il y a déjà eu des concentrations fortes de CO₂ dans l'atmosphère si l'on remonte très loin dans le temps, et donc des [températures moyennes un peu supérieures](#), mais qui n'ont probablement jamais dépassé les températures actuelles de plus de 5 à 10 degrés (rappelons que l'évolution que nous avons mise en route pourrait amener [une élévation de température de plus de 10 °C en quelques siècles](#)), car l'activité solaire (c'est-à-dire l'énergie rayonnée par le soleil) était alors bien plus faible. Et de toute façon, nous n'étions pas nés à ce moment-là !



Concentrations de CO₂ au cours des âges géologiques récents. RCO₂ est le rapport entre la concentration actuelle (en fait 300 ppm, soit 0,03%) et celle existant dans le passé. Par exemple $R = 5$ signifie que la concentration était de $5 \times 300 = 1500$ ppm, ou encore que le CO₂ occupait 0,15% de l'atmosphère.

On constate que la tendance de fond de l'ère Quaternaire (débutant il y a 4 millions d'années) et même de l'ère tertiaire (débutant il y a 70 millions

d'années, et pendant laquelle les mammifères se sont développés) était plutôt à la baisse.

Source : Berner, Science, 1997

En savoir plus (pour lecteur averti) sur les relations entre climat du passé et climat futur : un [article de Jean Jouzel & Claude Lorius](#) publié en mai 2000 dans La Jaune et La Rouge, revue des anciens élèves de l'Ecole Polytechnique

Un changement de climat, c'est juste un changement de moyennes ?

dernière version : février 2007

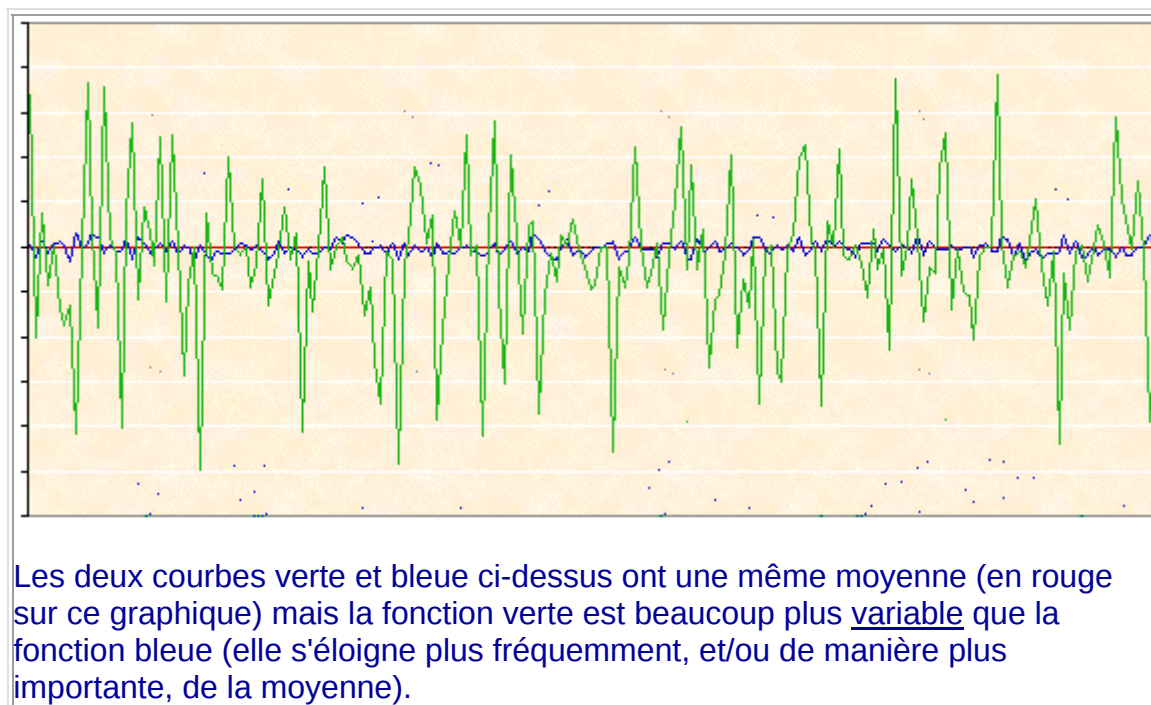
site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Si l'on se fie au dictionnaire (qui est une excellente référence !), les éléments du climat sont constitués de :

- l'insolation, c'est à dire la quantité d'énergie solaire reçue,
- la température,
- les précipitations, et l'humidité de l'air dans les couches voisines du sol,
- le vent,
- la pression atmosphérique,
- et accessoirement le champ électrique de l'atmosphère, l'ionisation de l'air, et sa composition chimique.

Par ailleurs ce qui définit un climat est tout à la fois les limites dans lesquelles peuvent évoluer les valeurs instantanées pour les diverses composantes mentionnées ci-dessus, mais aussi la moyenne annuelle de chacune de ces valeurs, les "sous-moyennes" saisonnières, et encore la variabilité. Ce dernier terme désigne la fréquence et l'amplitude avec lesquelles une valeur s'écarte de la

moyenne. Une valeur est dite très variable si elle s'écarte très fréquemment et/ou de manière très importante de la valeur moyenne.



Ainsi, une augmentation de la variabilité, même à moyenne constante, peut être source d'ennuis :

- si elle concerne les précipitations, cela signifie une moins grande régularité de ces dernières, et donc un accroissement des sécheresses et inondations,
- si elle concerne la température, cela peut signifier un accroissement des vagues de froid ou de chaleur,
- si elle concerne le vent, cela signifie un accroissement des épisodes ventés extrêmes...

Compte tenu du fait qu'un climat est défini par de nombreuses variables, un changement climatique **ne peut donc pas être réduit a priori à un simple changement de la température moyenne**. Il comprendra très probablement aussi une modification de la valeur moyenne ou de la variabilité des précipitations, des vents, de l'humidité moyenne du sol....

Sur quoi avons nous de la visibilité ?

Il y a aujourd'hui un consensus de la communauté scientifique pour considérer que d'augmenter significativement la teneur en [gaz à effet de serre](#) dans l'atmosphère engendrera un changement climatique, dont 2 conséquences font aujourd'hui également consensus :

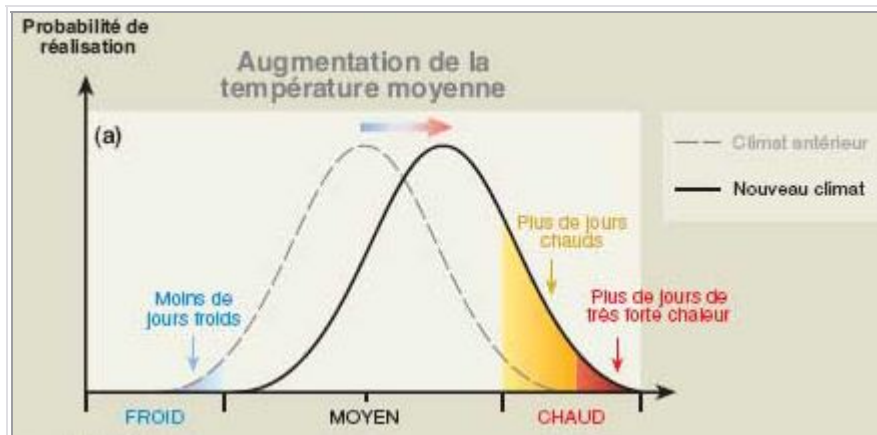
➤ la [température moyenne de l'atmosphère au niveau du sol augmentera](#), la seule question qui se pose étant de savoir de combien (et comme [la réponse dépend de nos émissions futures](#), cela restera un débat pendant longtemps !)

➤ le [niveau des océans](#) va monter.

Il y a donc une bonne raison à ce que l'attention se focalise le plus souvent sur ces deux conséquences d'un changement climatique : elles sont les plus certaines. Mais cela ne signifie pas que les autres paramètres ne vont pas aussi subir des modifications. Et surtout, une chose est essentielle : il ne faut pas confondre l'ignorance avec une garantie sur l'absence de risques ! "on ne sait pas" ne signifie pas "on ne risque rien"....

Moyennes et variabilité

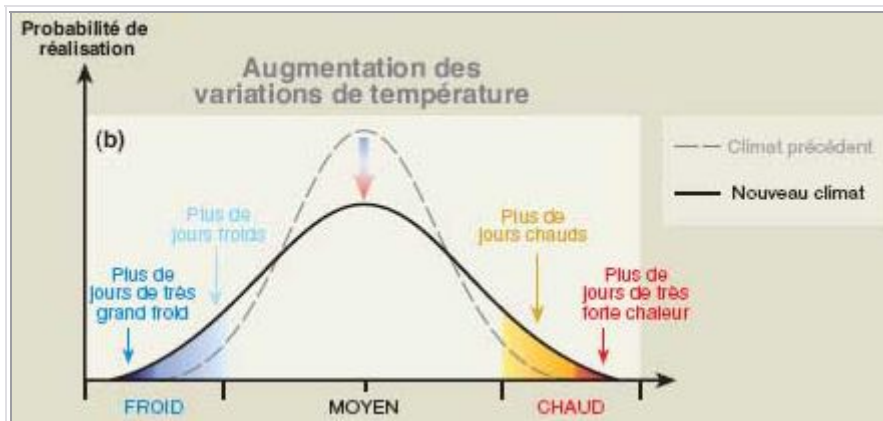
Enfin lorsque l'on évoque une modification d'un facteur donné, se focaliser sur la moyenne n'est pas suffisant. En particulier, pour savoir si l'avenir est susceptible de nous réserver des mauvaises surprises, avoir une idée de l'évolution de la variabilité est essentiel. Une illustration est donnée ci-dessous dans le cas particulier de la survenance à l'avenir d'extrêmes de température.



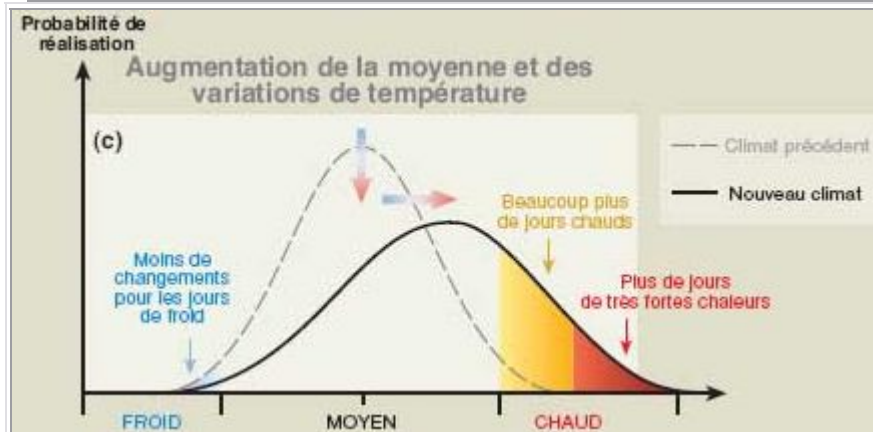
Les deux courbes ci-dessous représentent la distribution des températures annuelles dans le climat actuel (à gauche, en gris) et pour le climat futur (à droite, en noir).

Sur ce genre de graphique, c'est "l'aplatissement" de la courbe qui illustre la variabilité : quand la cloche est "plate", cela signifie que la probabilité que la température soit très loin de la moyenne augmente, et donc que la variabilité augmente. Il n'y a pas d'échelle, ni verticale, ni horizontale, ce qui est volontaire : la hauteur et la largeur de la courbe dépendent de manière cruciale du type de climat.

Le graphique ci-dessus illustre l'effet sur les extrêmes de froid et de chaud d'une élévation de la moyenne des températures (qui va se passer à l'avenir) "sans toucher" à la variabilité. Le nombre de jours très froid diminue, le nombre de jours chauds augmente, et il apparaît des jours très chauds inconnus auparavant.



Le graphique ci-dessus illustre l'effet sur les extrêmes de froid et de chaud d'une seule augmentation de la variabilité, sans toucher à la moyenne. Cela ne correspond pas à l'évolution en cours, puisque [la température moyenne augmente](#), mais c'est pour illustrer l'effet séparé d'une simple augmentation de la variabilité. Cela conduit à une augmentation du nombre de jours très froid comme des jours très chauds.



Le graphique ci-dessus illustre l'effet combiné d'une augmentation de la moyenne et d'une augmentation de la variabilité. Cela conduit à une diminution, mais **non à une disparition**, du nombre de jours très froid, et à une très forte augmentation du nombre de jours très chauds, ainsi que l'apparition d'extrêmes de chaleur inconnus avant.

Or si l'évolution possible des moyennes a fait l'objet de nombreuses études, il n'y a pas eu de travaux comparatifs aussi poussés sur la variabilité possible du climat futur. En d'autres termes, les [scientifiques](#) n'ont pas eu le temps ou les moyens, jusqu'à maintenant, de comparer attentivement ce que les divers [modèles de climat](#) indiquent en ce qui concerne la variabilité du climat futur, outre le fait que les [limitations des modèles](#) sur ce genre d'exercice sont beaucoup plus fortes que pour les évolutions des moyennes.

De ce fait, les conclusions des rapports du [GIEC](#) dans ce domaine restent très prudentes, comme c'est par exemple le cas sur les [phénomènes extrêmes](#) tels qu'ouragans, tempêtes, inondations, etc, et sont probablement destinées à le rester jusqu'à ce que les éventuelles mauvaises surprises arrivent, même si les indices disponibles laissent plutôt entrevoir une hausse de cette variabilité dans un climat en train de se modifier rapidement.

Comment peut-on savoir ce qui va se passer plus tard ?

dernière version : août 2007

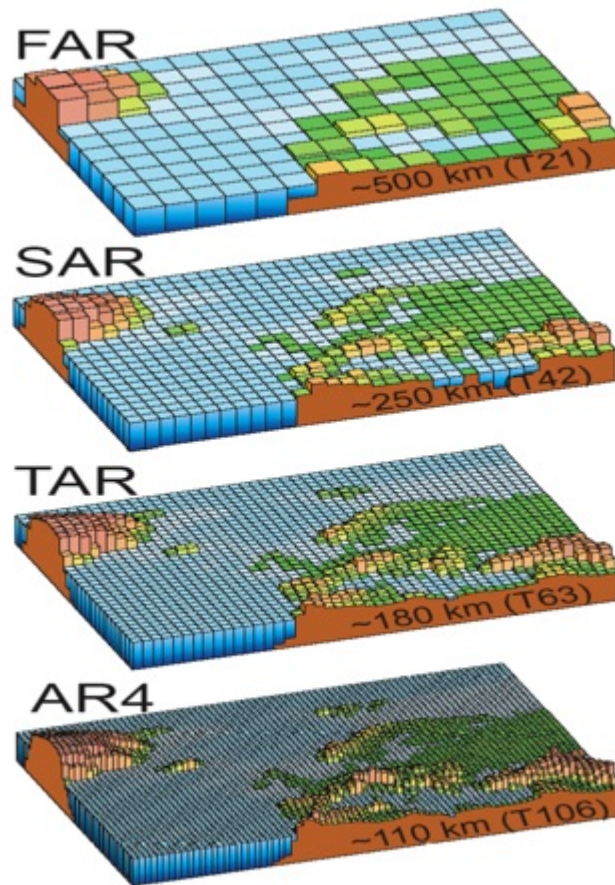
site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Les modèles

La situation climatique à venir va très probablement être totalement inédite depuis que l'homme a démarré son existence terrestre. Comme il est alors impossible de se tourner vers le passé récent pour avoir une idée de ce qui peut se passer plus tard, les seuls outils dont la [communauté scientifique](#) dispose pour tenter de savoir ce qui peut se passer à l'avenir sont des **modèles climatiques**.

Un modèle climatique n'est rien d'autre (nos amis scientifiques trouveront peut-être que ce n'est déjà pas si mal !) qu'un logiciel très complexe, dont le but est de reproduire aussi fidèlement que possible le comportement du climat terrestre. Il s'agit donc d'un gros programme pour ordinateur, construit de la manière suivante :

- les scientifiques compétents sélectionnent, au sein du système climatique planétaire, et chacun pour la partie qui le concerne, quelques paramètres qui sont considérés comme suffisants pour caractériser le système - ou le sous-système - dans son ensemble de manière satisfaisante pour la question posée (qui est celle de l'évolution de long terme du climat), par exemple la température annuelle moyenne et sa répartition par grande zone, les précipitations saisonnières par grandes zones, la couverture végétale avec le contenu en carbone de chaque type de couverture, etc.
- on exprime les relations d'un compartiment à un autre par des lois physiques (par exemple on exprime de manière explicite les fonctions qui permettent de passer de la température de surface à l'évaporation, ou encore les équations de la physique auxquelles l'atmosphère doit obéir en permanence, comme la conservation de l'énergie),
- à ce moment intervient la modélisation informatique proprement dite, c'est à dire que l'on représente, par des lignes de code informatique, les relations de cause à effet et les lois de la physique mentionnées ci-dessus,
- comme on ne peut pas décrire ce qui se passe absolument partout (cela demanderait de traiter un nombre infini de points, et aucun ordinateur n'aime beaucoup l'infini), on fait un **maillage** : on recouvre notre planète d'un filet imaginaire dont la maille (comme pour un filet de pêche, la maille est la distance qui sépare deux fils) mesure de l'ordre de quelques centaines de km de côté (cela dépend des modèles et de l'époque),



Evolution de la résolution (ou du maillage, c'est pareil) des modèles climatiques globaux au cours du temps : avant le premier rapport d'évaluation du GIEC (FAR pour First Assessment Report), c'est-à-dire dans la décennie 1980, la taille de la maille était typiquement de 500 km de côté. A cette époque, la France ne comptait que pour 4 mailles dans un modèle ! (c'était l'ordre de grandeur dans tous les modèles globaux ; certains modèles dits régionaux utilisaient des mailles plus petites - de l'ordre de 50 km - au-dessus d'une région particulière mais alors les mailles pour

le reste du monde pouvaient mesurer jusqu'à 1000 km de côté).

Au moment du 2^e rapport d'évaluation (SAR pour Second Assessment Report ; 1995) la taille de la maille avait été divisée par 2, et aujourd'hui (AR4, pour 4th Assessment Report, publié en 2007) elle a encore été divisée par 2 par rapport à la décennie 1980.

Source [GIEC](#), 2007

➤ comme la planète est un système en 3 dimensions, le monde n'est pas découpé en petits rectangles, mais plutôt en "boîtes à chaussures", avec quelques dizaines de niveaux de "boîtes" le long de la verticale,

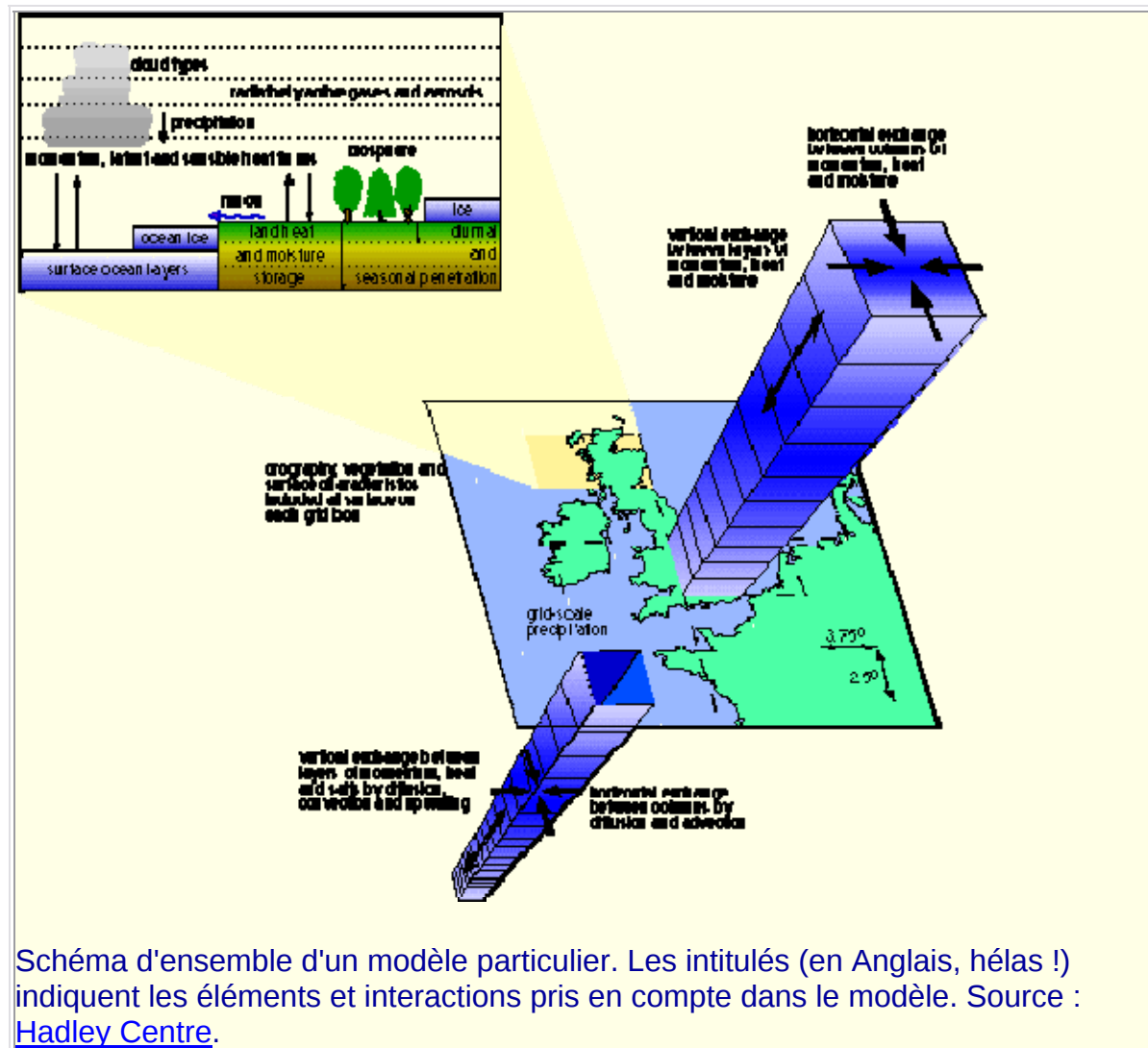


Schéma d'ensemble d'un modèle particulier. Les intitulés (en Anglais, hélas !) indiquent les éléments et interactions pris en compte dans le modèle. Source : [Hadley Centre](http://www.hadley.ac.uk/).

➤à chaque "noeud" de ce maillage en trois dimensions (c'est à dire aux sommets de chaque boîte à chaussures), ou au sein de chaque boîte (cela dépend du paramètre considéré), on fixe les conditions de départ en indiquant les valeurs initiales des différents paramètres avec lesquels l'ordinateur va travailler : si on a affaire à une terre émergée ou à de l'eau, éventuellement quel type de végétation l'occupe, quelle est la température moyenne de départ, la pression, l'humidité, la salinité pour l'eau de mer, la couverture nuageuse, le vent, et plus généralement on initialise tous les paramètres utilisés,

➤puis on fait "tourner le modèle", c'est à dire que l'ordinateur se lance et calcule, sur la base des règles qui lui ont été fournies et des valeurs initiales, comment évoluent les paramètres à chaque "noeud" du filet - ou au sein de chaque "boîte" - à intervalles de temps réguliers (en fonction de la puissance informatique dont on dispose, ce sera tous les mois ou toutes les demi-heures !).

L'un des avantages de ces modèles est qu'ils peuvent facilement permettre une comparaison "virtuelle" de deux évolutions du monde (ce qui est impossible dans la réalité, puisque l'histoire ne s'écrit qu'une fois). Il est ainsi possible de spéculer sur ce qui se passe "si" ("si" les hommes émettent des gaz à effet de serre, certes, mais les mêmes modèles servent aussi à reconstituer les climats de la préhistoire ou même à comprendre ce qui se passe sur Mars !). Pour prendre en compte une perturbation humaine qui évolue au cours du temps, par exemple l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre, il suffit de rajouter une équation dans la liste, ou d'imposer une valeur donnée à un paramètre donné.

La modélisation est une discipline qui ne date pas d'hier : les premiers modèles - purement atmosphériques - datent des années 60 (le [premier modèle atmosphérique date même de 1950](#), et a été testé sur le premier ordinateur existant, l'ENIAC). Ce qui a permis un essor rapide de la discipline est plus l'augmentation de la puissance informatique disponible (et l'avènement des satellites, qui ont fourni pléthore de données d'observation qui ont pu être confrontées aux sorties de modélisation) que des percées majeures en physique, physique qui était déjà assez bien connue il y a quelques dizaines d'années (avec comme conséquence que les premières "alertes" sur le réchauffement climatique datent de la fin des années 1960).

Par exemple, le temps de calcul pour simuler un mois d'évolution a été divisé par plus de 100 entre 1980 et nos jours !

Plus la puissance informatique augmente, et plus on peut utiliser des mailles de petite taille. Plus on travaille sur des périodes courtes, et plus on peut aussi diminuer la maille (ce qui augmente la précision des prévisions) : les météorologues, qui ne s'intéressent pas au climat qu'il y aura dans quelques siècles, mais à celui qu'il y aura demain ou dans 3 jours, travaillent sur des

modèles atmosphériques identiques à la partie "atmosphère" des modèles de climat globaux, mais avec des mailles de quelques kilomètres de côté seulement.

Un petit glossaire

Selon la manière dont ils sont construits et ce qu'il prennent en compte, les modèles sont désignés avec des sigles différents. En voici quelques uns :

GCM signifie "Global Circulation Model", et donc en Français "Modèle de Circulation Globale". Il s'agit d'un modèle global, à larges mailles, pour donner des tendances de long terme sur de larges zones.

AGCM signifie "Atmospheric Global Circulation Model". Il s'agit d'une catégorie particulière de GCM, qui ne prennent en compte que l'atmosphère. Cela ne donne des prédictions valables que tant que les autres composantes (sols, océans, glaces) ne bougent pas, et en pratique il s'agit des modèles utilisés pour les prévisions météo.

AOGCM signifie "Atmospheric Oceanic Global Circulation Model". Il s'agit d'une autre catégorie de GCM, qui prennent en compte l'atmosphère et l'océan. On voit parfois aussi "Atmospheric Oceanic Global Coupled Model", car dans ces modèles non seulement l'océan est pris en compte, mais aussi les interactions entre l'océan et l'atmosphère. Ce sont ces modèles qui sont utilisés en climatologie.

Il arrive enfin que la lettre R s'intercale quelque part à la place du G : il s'agit alors de modèles régionaux.

Combien de modèles ?

Il existe actuellement [une quinzaine de modèles globaux de par le monde](#), développés par autant d'équipes pluridisciplinaires (un grand pays en a rarement plus de 2 ou 3), qui regroupent environ 2.000 [scientifiques de disciplines variées](#). Toutefois le nombre total de scientifiques de disciplines différentes qui concourent à la construction ou à l'alimentation des modèles est bien supérieur, au moins d'un facteur 10 : pour "savoir quoi mettre" dans ces modèles il faut faire appel à des travaux déjà effectués par des physiciens, des chimistes, des biologistes, des géologues, des océanographes, des aérologues, des glaciologues, des énergéticiens, des démographes...

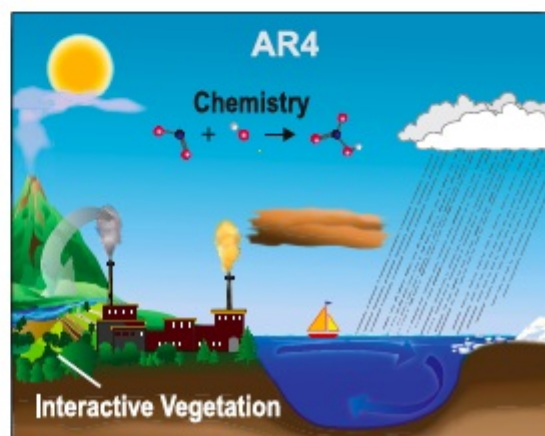
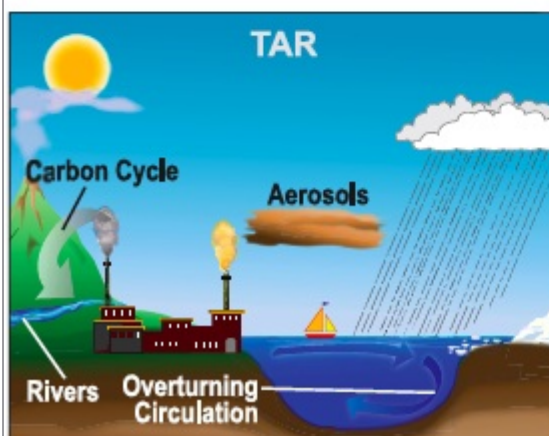
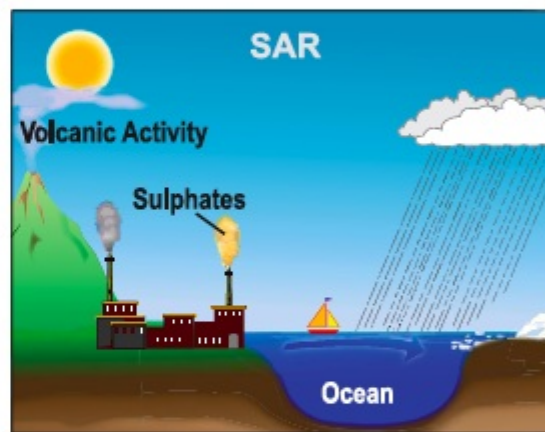
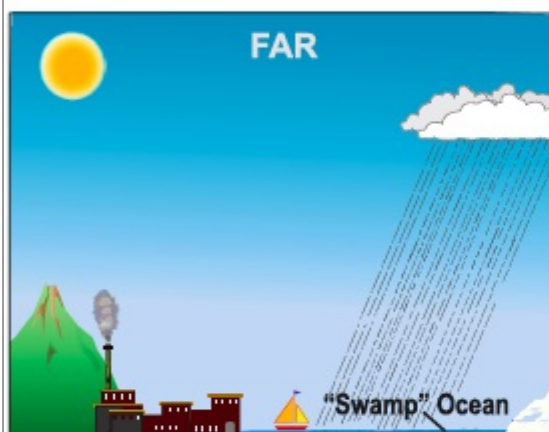
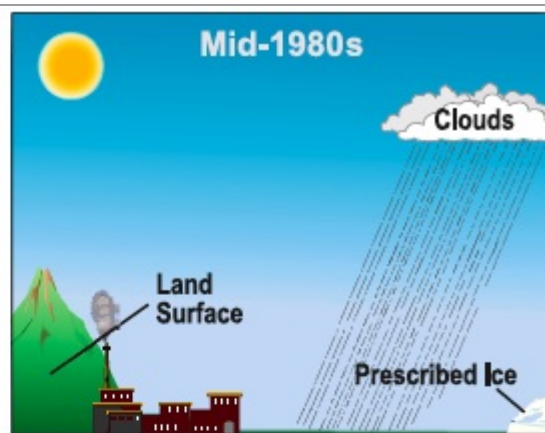
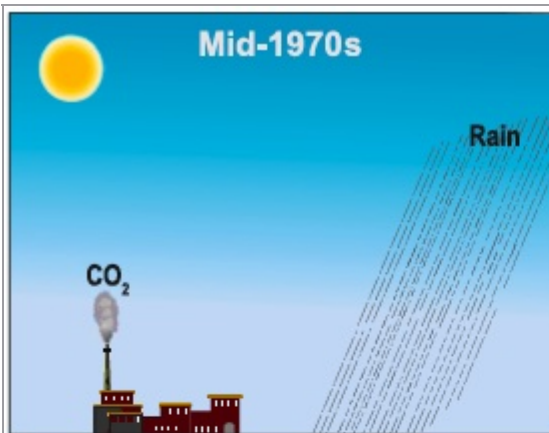
En France, l'un des pôles de modélisation et d'étude du climat est l'[Institut Pierre Simon Laplace](#) (IPSL), rassemblant :

- le [Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS](#) (unité commune à l'Ecole normale, l'Ecole Polytechnique, et l'Université de Paris VI - Jussieu)
- le [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#) (unité mixte CEA - CNRS).
- le [Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie](#) (unité mixte IRD - CNRS - Jussieu).
- le [Service d'Aéronomie](#) (unité mixte CNRS - Jussieu - Université de Versailles-Saint Quentin).
- le [Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires](#) (unité mixte CNRS - Jussieu - Université de Versailles-Saint Quentin).
- le Laboratoire de Physique et Chimie Marines

Que prennent-ils en compte ?

Les lois de la physique restent bien entendu les mêmes partout et tout le temps, mais ces modèles sont quand même assez différents les uns des autres : les uns prennent en compte les effets des nuages comme ceci, les autres comme cela, les uns

prennent en compte certains phénomènes de la biosphère (la biosphère est l'ensemble des êtres vivants), les autres pas, etc. Ce qui différencie le plus les modèles les uns des autres, cependant, est surtout la date à laquelle ils ont été terminés.



Si nous regardons un peu plus dans le détail, voici les principaux items pris en compte dans les modèles utilisés aujourd'hui. Attention ! "Pris en compte" ne veut pas dire que tout est connu sur le point considéré, mais simplement que "on en parle" dans le modèle :

- les échanges d'énergie, en particulier sous forme de [rayonnement électromagnétique](#), entre la Terre, l'océan, l'atmosphère et l'espace (tous les modèles).
- les transferts radiatifs dans l'atmosphère, c'est à dire la manière dont le rayonnement solaire et celui émis par la Terre traversent l'atmosphère ou sont absorbés par les divers [gaz à effet de serre](#) contenus dans cette dernière,

Comme on l'a vu, il n'y a pas un seul mais plusieurs [gaz à effet de serre](#). Ces gaz ne sont pas toujours pris en compte de manière indépendante dans les modèles : on commence par faire la "somme" des différents gaz émis, en les pondérant par leurs [pouvoirs de réchauffement respectifs](#), et c'est cette "somme" que l'on utilise pour représenter les émissions de tous les gaz à effet de serre.

Une telle simplification, si elle est appliquée, empêche d'étudier facilement par les résultats de la modélisation les effets d'un début de réchauffement sur les émissions "naturelles" de gaz à effet de serre pris un par un. C'est notamment le cas pour le méthane, dont la vitesse d'élimination dans l'atmosphère dépend significativement de sa concentration.

- la circulation de l'air dans l'atmosphère (tous les modèles), et donc les transports d'eau qui y sont associés,
- la circulation océanique (tous les modèles), et les interactions entre l'océan et l'atmosphère,
- la formation et la fonte de la glace de mer (tous les modèles),

- les nuages (tous les modèles), mais une modélisation correcte des nuages reste un des points où la marge de progression est très importante,
- les échanges de carbone entre l'atmosphère et la planète (tous les modèles, mais avec des degrés de sophistication différents), et depuis peu certaines rétroactions du réchauffement sur les émissions "naturelles" de gaz à effet de serre, et notamment le comportement de la végétation (pas tous, et avec des degrés de sophistications différents).

Quelles sont leurs faiblesses ?

Les trois grandes sources d'incertitude des modèles sont les suivantes :

- Tout d'abord **notre système atmosphérique n'est pas entièrement prévisible**. C'est bien pour cela qu'il arrive que la météo - qui travaille avec les mêmes équations de la physique, même si leurs modèles sont essentiellement atmosphériques - se trompe, même si, statistiquement, elle a souvent raison (mais on entend surtout parler des fois où elle se trompe, ce qui induit un effet de déformation : il ne faut pas que l'arbre masque la forêt !). Cela entache d'incertitude les transferts d'énergie vers l'espace (et donc la température moyenne de la planète), la répartition régionale du changement climatique, etc.
- Ensuite il y a d'**inévitables simplifications lorsque l'on construit un modèle**. Il est cependant légitime et courant de procéder de la sorte : le simple fait que l'on ait fait une simplification n'est pas nécessairement une source d'erreur. Par exemple, le plan de l'architecte ne reproduit pas tous les détails du futur bâtiment mais seulement les "choses les plus importantes" : pour autant, se fera-t-on une mauvaise idée de la facilité avec laquelle on circulera dans le bâtiment ?
- **ils ne représenteront toujours qu'une partie du système** (mais heureusement cela suffit à souligner l'existence de [risques importants](#)). Parmi les éléments qui doivent être mieux pris en compte, on peut citer :
 - les nuages (car il s'agit d'objets de petite taille relativement à la taille de la maille, donc que l'on est donc obligé de traiter de manière approchée),

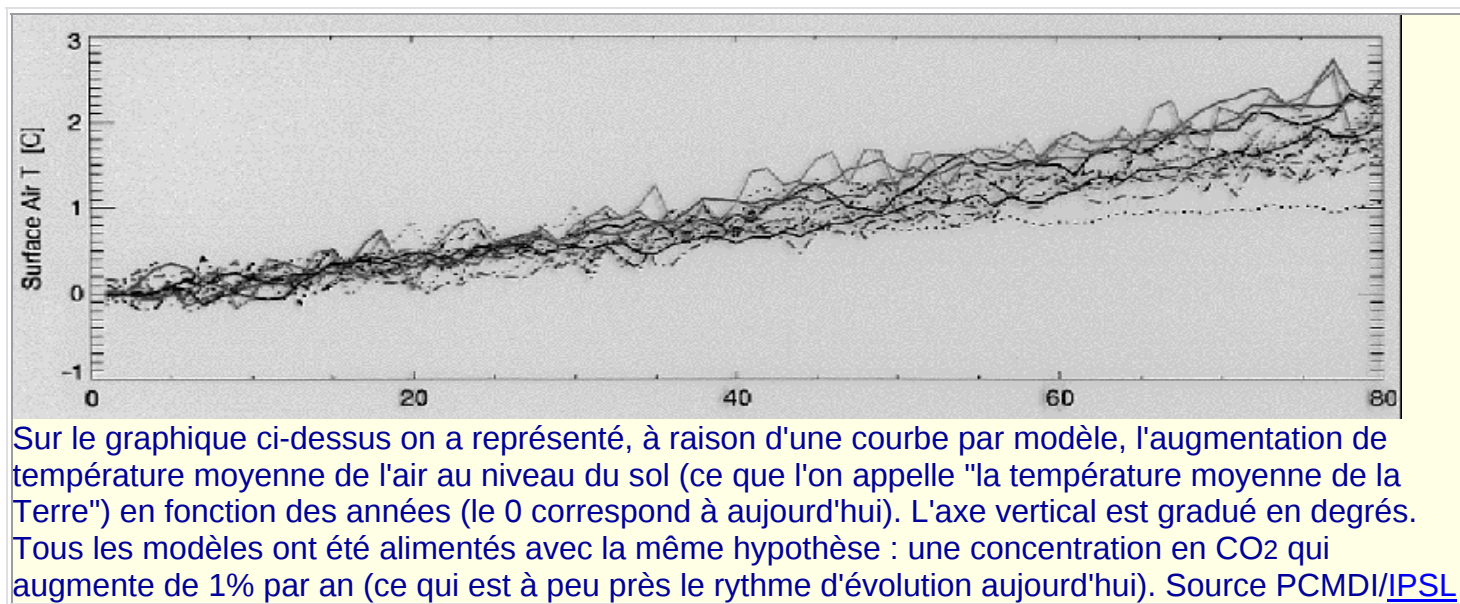
- ▶ puits et sources du carbone océanique et continental, et notamment influence de la biosphère, avec une limite qui est que la biosphère est toujours dépendante de conditions locales et que la modification de ces dernières est plus incertaine que la modification des conditions "globales",
- ▶ l'évaporation continentale, qui fait aussi intervenir des processus de petite échelle (c'est à dire de "petite taille" par rapport à la taille de la maille),
- ▶ la circulation océanique profonde (qu'il est difficile de mesurer, donc pour laquelle il est difficile de comparer ce que dit le modèle avec la réalité),
- ▶ le cycle du méthane (le gaz du "pourrissement"), et du protoxyde d'azote, où les sources naturelles ne sont pas quantifiées avec précision,
- ▶ la prise en compte de l'augmentation de [l'ozone troposphérique](#) (celui qui est près du sol), car cela dépend d'une chimie atmosphérique complexe,
- ▶ le rôle des [aérosols](#) organiques ou minéraux (les poussières).

Mais il ne faudrait pas déduire du fait qu'il reste des zones d'ombres que l'on peut ignorer les résultats, ce qui serait jeter le bébé avec l'eau du bain ! En outre, ces outils sont en perpétuelle évolution, et donc en perpétuelle amélioration.

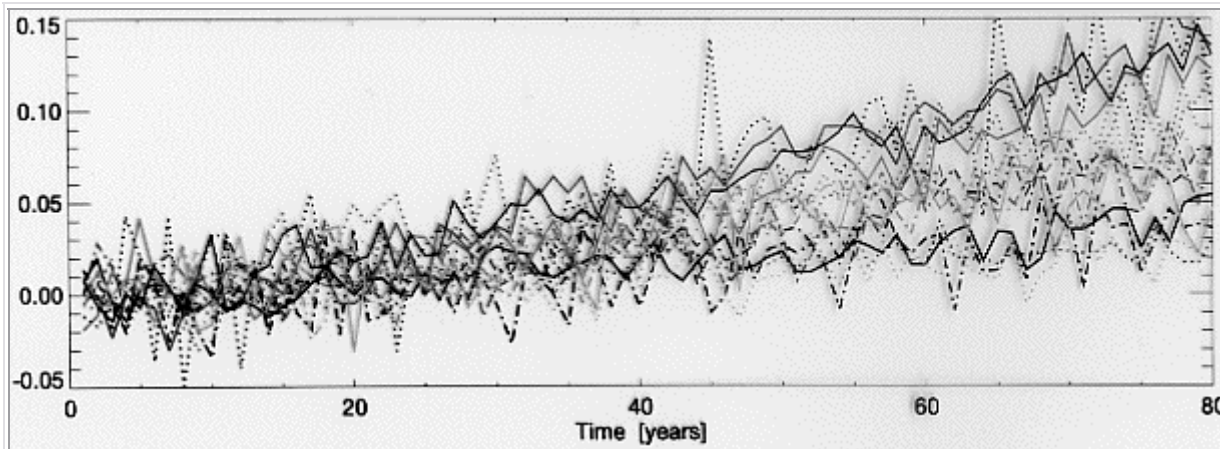
Premières conclusions des modèles

Un point essentiel est que, même si ils sont construits de manière différente, même si les résultats chiffrés auxquels ils parviennent ne sont pas rigoureusement identiques, **tous ces modèles aboutissent à des conclusions de même nature : l'homme modifie le climat dans le sens d'un réchauffement global de la planète.** En outre ces modèles indiquent aussi que l'influence humaine sera de plus en plus forte si les émissions de [gaz à effet de serre](#) continuent comme maintenant.

➤ La température moyenne de la planète va augmenter. Selon le [scénario d'émission pris en compte](#), il est question de [1°C à 6 °C à l'horizon d'un siècle](#).



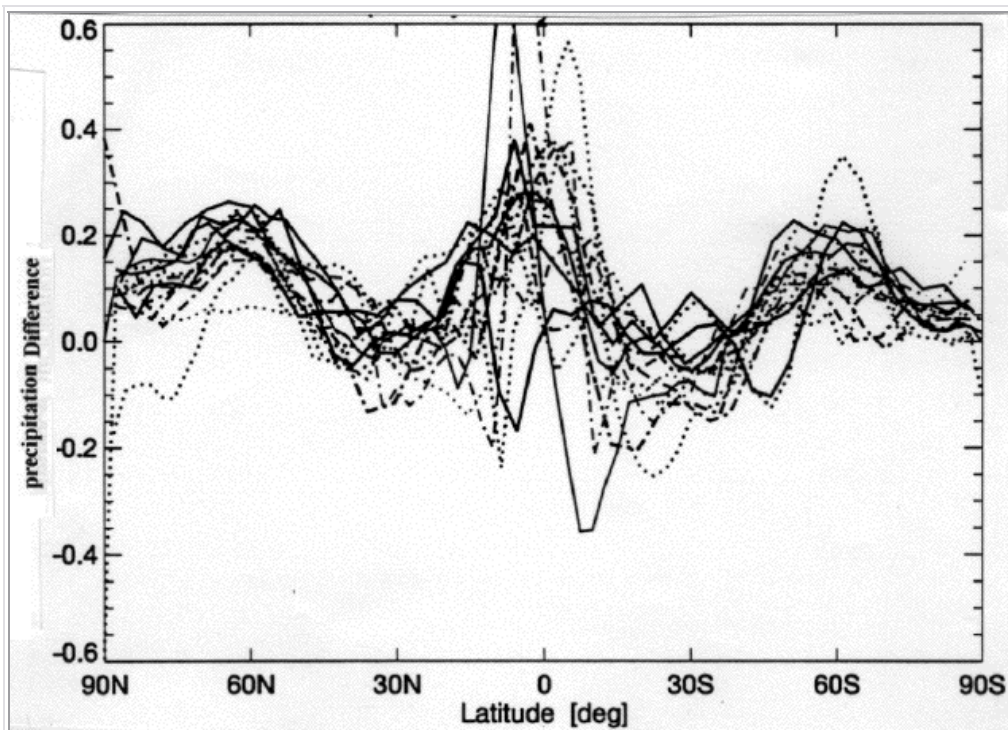
➤ Les échanges d'eau entre la surface et l'atmosphère vont augmenter (cf. schéma ci-dessous). Cela peut s'expliquer assez simplement (même sans modèle !) : un air globalement plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau, et donc l'évaporation augmentera. Comme la vapeur d'eau ne s'accumule pas dans l'atmosphère, tout ce qui monte doit redescendre, et donc une évaporation accrue engendrera globalement plus de précipitations (et du reste [pendant les périodes glaciaires](#), durant lesquelles le climat est plus froid, il fait beaucoup plus sec). Cela signifiera qu'il va pleuvoir plus souvent, ou....plus fort (avec une augmentation du risque d'inondations dans ce dernier cas)



Les courbes ci-dessus (une courbe par modèle) donnent l'évolution des précipitations moyennes annuelles par rapport à la situation actuelle (0 des ordonnées). Tous les modèles partent de la même hypothèse d'une concentration en CO₂ qui augmente de 1% par an. L'axe vertical est gradué en millimètres d'eau par jour.

Lorsqu'une courbe franchit la valeur 0,05, par exemple, cela signifie qu'à ce moment là les précipitations moyennes à la surface du globe augmentent de 0,05 mm d'eau par jour, soit un peu plus de 18 mm d'eau par an, soit encore 3,5% des précipitations actuelles (520 mm d'eau par an en moyenne).

Toutefois ce surplus de précipitations ne serait pas réparti de manière égale partout : les modèles prévoient de grandes disparités en fonction de la latitude.

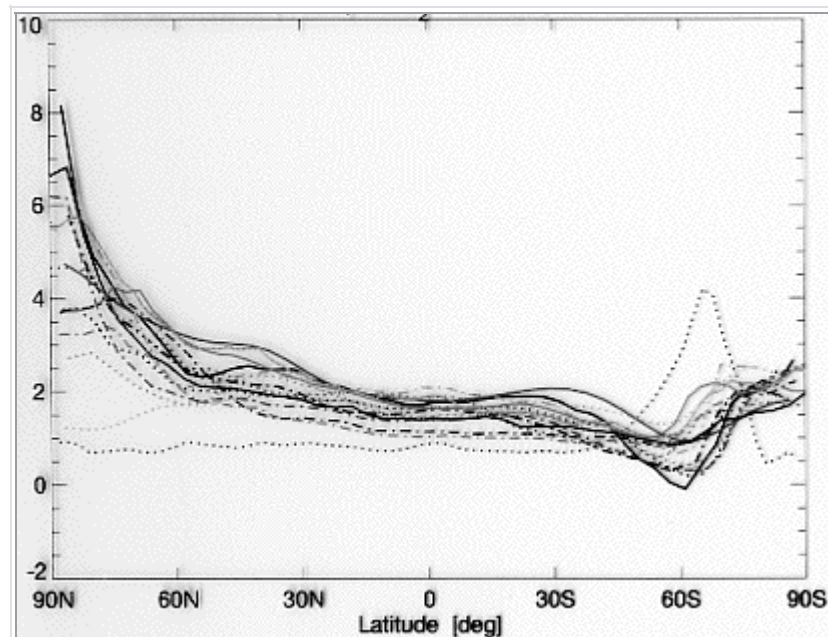


Les courbes ci-dessus (une courbe par modèle) donnent la répartition du surplus (ou du déficit) de précipitations en fonction de la latitude au moment où la concentration de CO₂ dans l'atmosphère aura doublé (dans 60 à 80 ans si "[rien ne change](#)"). L'axe vertical est gradué en mm d'eau par jour, et donne donc la différence de la moyenne journalière de précipitations (pour la terre entière) entre la situation future de la simulation et aujourd'hui.

On voit par exemple que à la latitude 60° Nord (Nord de l'Ecosse, Sud de la Norvège, où il pleut déjà pas mal, il pleuvrait encore plus (70 mm d'eau par an en plus en moyenne) alors que vers 30°N (Californie, Sahara, Mongolie, bref des endroits peu arrosés) il pleuvrait autant ou plutôt moins, et que vers 30 °S (Afrique du Sud, Australie, Argentine) il pleuvrait plutôt un peu moins. Source PCMDI/[IPSL](#)

➤ Enfin il y aura un réchauffement plus prononcé :

- ▶ la nuit (par opposition au jour),
- ▶ l'hiver (par opposition à l'été, ce qui n'est pas sans conséquence pour la végétation, voir plus loin),
- ▶ aux pôles (par opposition aux moyennes latitudes),



Les courbes ci-dessus (une courbe par modèle) donnent l'augmentation de température en fonction de la latitude au moment où la concentration de CO₂ dans l'atmosphère aura doublé (dans 60 à 80 ans en "prolongation tendancielle"). On voit que les glaces du Pôle Nord (90° de latitude Nord, à gauche sur la figure) sont les premières concernées : à ce moment là,

l'augmentation moyenne de température au Pôle Nord pourrait aller jusqu'à 8° C !

Source [IPSL](#)

Les 3 différences mentionnées ci-dessus proviennent peuvent être expliquées avec la même raison : l'[effet de serre](#) correspond à l'interception du rayonnement terrestre, lequel ne disparaît pas la nuit ou l'hiver. Cet effet est donc proportionnellement plus important partout où il n'y a pas de soleil. En effet, en l'absence de notre astre du jour, l'effet direct du chauffage solaire n'existe plus (ou est réduit en hiver), pendant que l'effet indirect de chauffage du sol provenant de l'effet de serre décroît moins vite. De ce fait l'effet relatif de son augmentation (de l'effet de serre) est plus sensible quand il n'y a pas de soleil (en hiver et la nuit). Un autre processus va dans le même sens : quand il n'y a pas de soleil, l'air est plus froid, donc plus sec, et l'effet de serre "naturel" dû à la vapeur d'eau est plus faible. En conséquence, l'effet de serre additionnel dû à l'augmentation du CO₂ dans l'air (lequel est réparti de manière homogène et indépendant de la température) est proportionnellement plus élevé là où la température est basse (à l'Equateur, où l'air est déjà saturé en vapeur d'eau, l'augmentation de la concentration en CO₂ a un effet bien plus faible sur l'effet de serre qu'aux pôles). Cela explique aussi pour partie de l'augmentation de température plus marquée près des pôles.

► sur les continents (par opposition aux océans), car l'inertie thermique des grandes masses d'eau est très supérieure à celle du sol ; un facteur 1,5 à 2 étant parfaitement possible entre l'augmentation globale et celle au-dessus des continents de l'hémisphère Nord. Cela signifie que pour 3 °C d'augmentation de la température moyenne, qui correspond à un scénario d'émission qui reste [compatible avec les ressources fossiles inventoriées](#), nous pourrions avoir près de 5° C d'augmentation moyenne au-dessus des continents. Et que dire quand on sait que la température moyenne [pourrait monter de 8 à 9 °C d'ici à 2 siècles](#) !

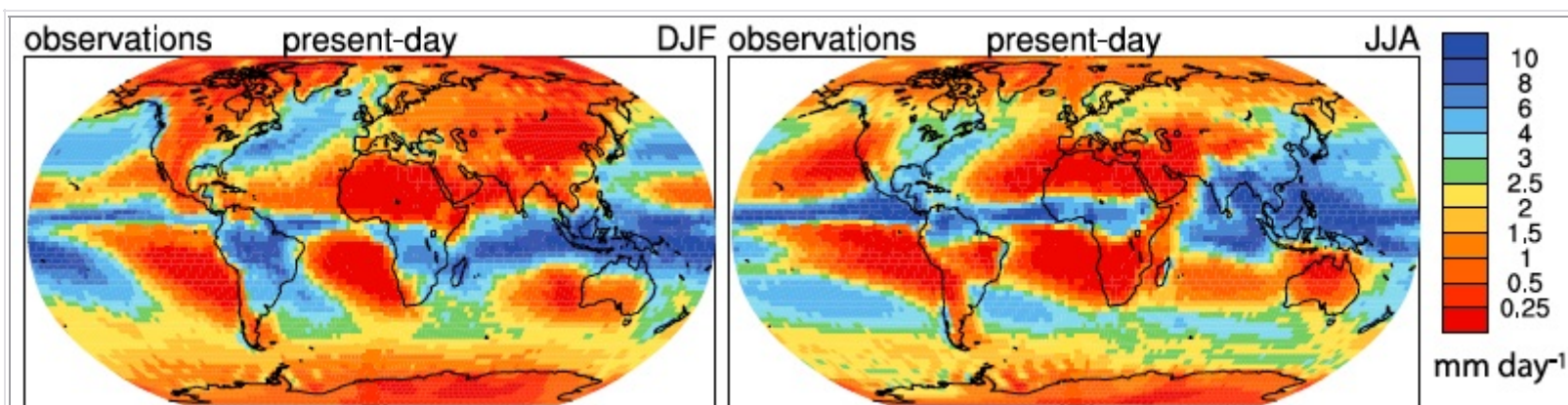
Peut-on faire confiance aux modèles climatiques ?

dernière version : août 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

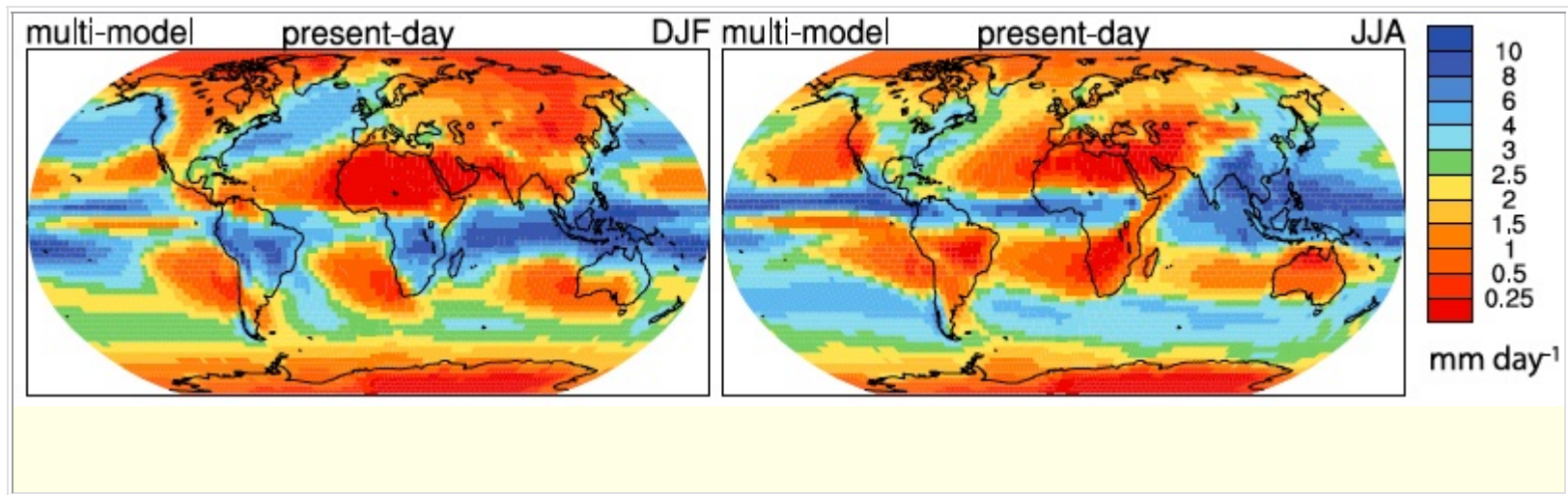
Allons directement au point important : la réponse est essentiellement **oui**. Pour ceux qui voudraient aller au-delà d'une réponse en un seul mot (d'aucuns sont de ces pinailleurs, je vous jure...), essayons d'aller un peu dans le détail :

- La modélisation du climat ne repose pas sur un seul outil identique utilisé par tout le monde, mais 23 modèles différents ont été construits à la date du dernier rapport du [GIEC](#) (tous les pays ayant une activité scientifique significative possèdent désormais une équipe s'occupant de simulation du climat futur),
- l'une des premières choses faite avec un modèle n'est pas de regarder l'avenir mais le passé ou le présent, pour vérifier que le modèle ne décrit pas un monde actuel qui n'existe pas !

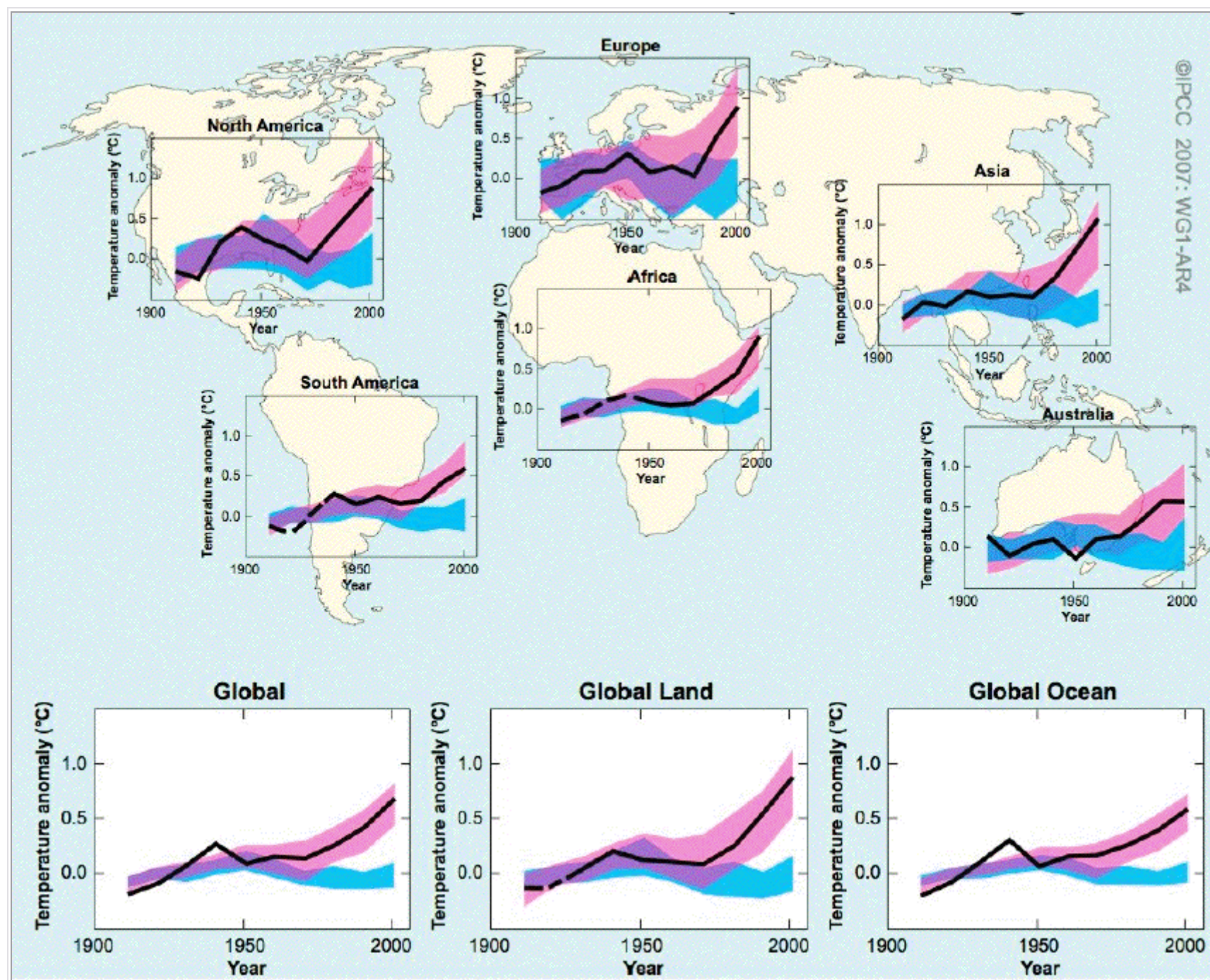


Le graphique ci-dessus donne une vision cartographiée des précipitations actuelles (découlant donc des observations), en moyenne saisonnière (à gauche : décembre-janvier -février, à droite : juin-juillet-août), en mm de pluie par jour (1 mm de pluie par jour = 90 mm de pluie sur le trimestre = 180 mm de pluie par an).

Le graphique ci-dessous représente la moyenne inter-modèles des précipitations simulées (on regarde donc ce qui sort du modèle quand on lui demande "que pleut-il et où aujourd'hui". L'aptitude des modèles à représenter d'assez près la réalité est frappante, même si ce n'est pas une représentation parfaitement identique. Il faut savoir que la simulation correcte du cycle de l'eau est bien plus difficile que celle des températures.



Une deuxième indication du fait que les modèles sont fiables découle non de l'observation de ce qui se passe aujourd'hui, mais de l'observation des tendances passées. Il est bien sûr possible de démarrer une simulation non pas d'aujourd'hui, pour savoir ce qui va se passer plus tard, mais d'un passé plus ou moins ancien (entre la fin du 19^e siècle et le début du 20^e, car ce sont les périodes où l'on a commencé à disposer de mesures fiables et précises de la température), pour comparer ce que dit le modèle avec ce qui a été réellement observé.



Les graphiques ci-dessus indiquent, pour chaque région du monde (et, en bas, pour l'ensemble de la planète, l'ensemble des terres émergées, et l'ensemble de l'océan mondial) :

➤ en noir, l'évolution de la moyenne décennale des températures de 1906 à 2005 telle qu'elle découle des relevés (avec des tiretés quand il y a peu de points de mesure ; le zéro correspond à la moyenne des années 1901-1950),

➤ la zone rose donne l'enveloppe de 58 simulations faites avec 14 modèles différents sur l'évolution régionale de la température en incluant tous les "forçages" du système climatique sur la période (c'est à dire les modifications du rayonnement solaire, du volcanisme, etc), y compris les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine,

➤ la zone bleue donne l'enveloppe de 19 simulations faites avec 5 modèles différents sur l'évolution régionale de la température en supposant qu'il n'y a jamais eu d'émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine,

Ces courbes permettent d'aboutir à deux conclusions d'importance :

➤ la première est tout simplement que les modèles reproduisent à peu près fidèlement les évolutions globales si l'on tient compte de tous les paramètres. Cela accrédite fortement l'idée que les tendances qu'ils nous donnent pour l'avenir sont fiables (attention : les résultats quantitatifs dépendront toujours des hypothèses faites sur les émissions !) .

➤ il est évident que les modèles ne savent pas reproduire ce qui s'est produit depuis 1970 sans faire intervenir les émissions d'origine humaine : en particulier le réchauffement observé depuis 1970 semble bien être, avec une probabilité très faible de se tromper, le début de l'influence de l'homme sur le climat.

Source : GIEC, Summary for Policymakers of the 4th assessment report (working group 1), 2007

Il y a d'autres confirmations par les modèles d'observations climatiques récentes :

➤ les températures ont tendance à augmenter plus vite l'hiver que l'été (ce que prévoient les modèles),

➤ elles ont tendance à augmenter plus vite la nuit que le jour (ce que prévoient aussi les modèles),

➤ certains modèles ont été testés sur Mars et Vénus où ils rendent bien compte de ce qui est observé ; Vénus a un système climatique plus simple que celui de la Terre (il n'y a ni océan, ni glaces polaires, ni êtres vivants) mais présente un phénomène particulier dans son atmosphère (la rotation de l'atmosphère est plus rapide que celle de la planète) dont le rendu par les modèles est assez fidèle.

➤ sur notre bonne vieille terre, les modèles reproduisent désormais de manière satisfaisante les diverses composantes du climat : les zones climatiques (pas de climat équatorial au milieu de l'Antarctique !), le rythme des saisons, les divers courants atmosphériques ou océaniques (alizés, jets atmosphériques, Gulf Stream...), les oscillations pluriannuelles (El Niño, NAO), etc.

Le milieu scientifique est donc désormais très confiant dans les [principales conclusions qualitatives des modèles](#), et en particulier que la température moyenne au niveau du sol va augmenter en réponse à nos émissions de [gaz à effet de serre](#). Cela ne signifie pas, bien entendu, que ces outils sont désormais aussi parfaits que possible : une intense activité de recherche se poursuit pour les améliorer, c'est à dire qu'ils soient capable de reproduire de plus en plus précisément les phénomènes observés.

Mentionnons pour finir que si une équipe de modélisation parvenait, à la suite de travaux sérieux (c'est à dire dans lesquels les autres scientifiques ne constatent pas d'erreurs de méthode et qui fasse l'objet d'une publication dans une revue scientifique de premier rang), à la conclusion que la Terre ne va pas se réchauffer suite aux émissions humaines de gaz à effet de serre, elle deviendrait mondialement célèbre dans la minute, et serait probablement un bon candidat au Prix Nobel. Il est certain que bien des scientifiques ont cherché dans cette direction ! (rappelons que, qualitativement, [cette conclusion a près de deux siècles...](#))

Par contre les prévisions locales (est-ce que ce réchauffement sera plus fort en France ou en Allemagne, par exemple) sont très difficiles à établir, et le resteront probablement jusqu'à ce que...il se passe quelque chose.

En effet, le système climatique est un système très "instable", et une petite variation quelque part peut avoir un effet très important plus tard et plus loin.

Hormis quelques indicateurs (la température moyenne, ou les précipitations moyennes) sur quelques grandes zones (un continent par exemple), il ne sera jamais possible de faire des prévisions locales détaillées. Cela fait partie des **limites normales** de la

modélisation climatique, car le système lui-même n'est pas prévisible de manière détaillée à l'échelle locale (impossible de dire quelle température il fera à Hong Kong le 6 juillet 2045 !), et ne doit pas nous faire penser que les conclusions générales ne sont pas bonnes ou qu'il n'y a pas de danger.

Rejeter les modèles à cause de cette imprécision, ce serait un peu comme si l'on considérait que ce n'est pas la peine de donner un temps de transport approximatif pour aller de Paris à Bordeaux en train parce que l'on n'est pas capable de le donner à la seconde près : certaines prévisions sont impossibles à faire de manière exacte, mais n'en restent pas moins précieuses pour les tendances et les grandes masses.

Pour approfondir le sujet (pour lecteurs un peu avertis) : [l'article de Hervé Le Treut](#), paru dans La Recherche en 1997 et repris dans La Jaune et La Rouge en mai 2000 , sur le degré de confiance que l'on peut accorder aux modèles

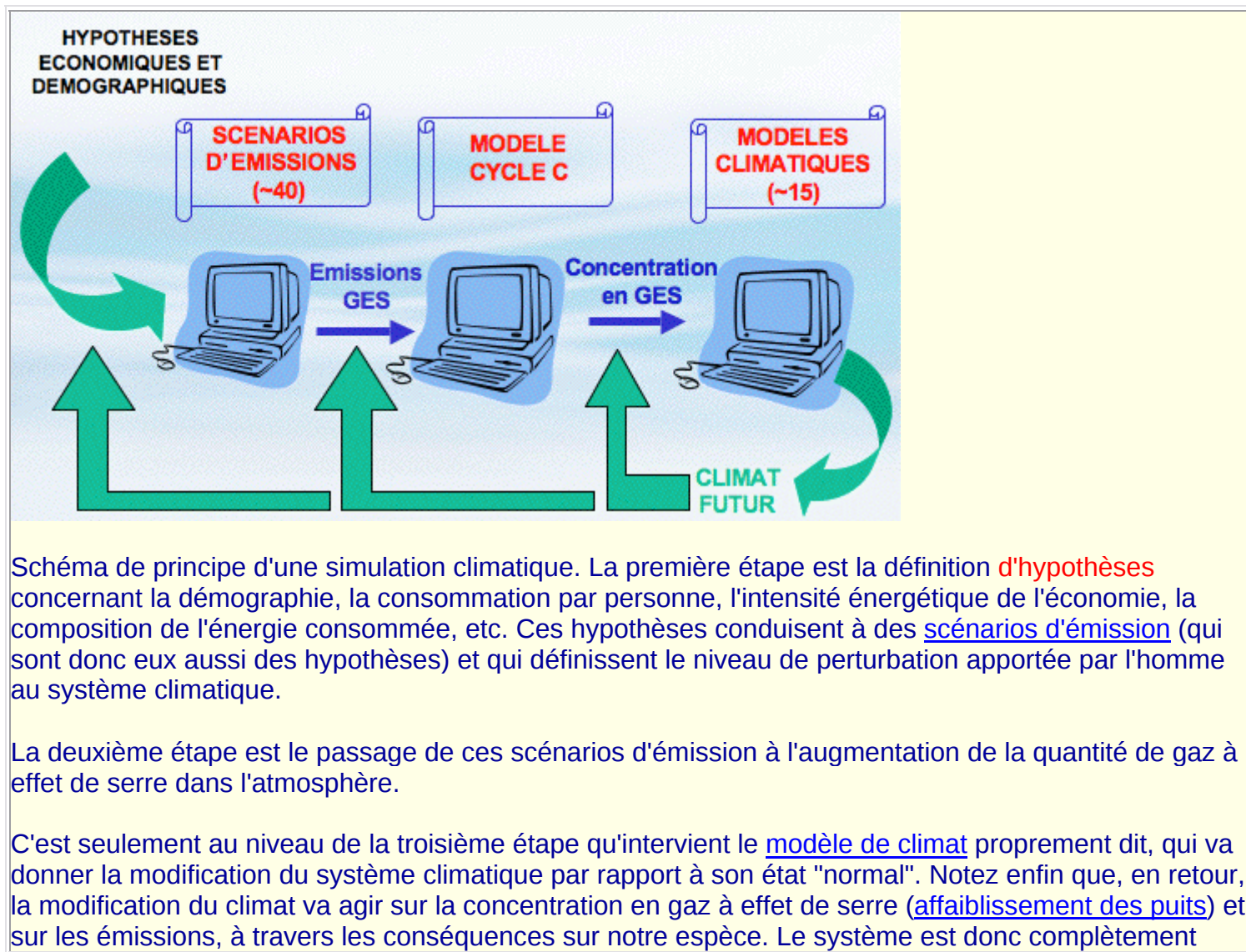
Combien de degrés en plus ?

dernière version : février 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Une des conclusions fortes du dossier climatique est que la température moyenne au niveau du sol va augmenter si la concentration de l'atmosphère en [gaz à effet de serre](#) augmente. Mais de combien ? On entend parler ici d'une fourchette de 1,5 à 6 °C à l'horizon du siècle, là d'une possibilité que cela gagne plus de 10°C "un jour", là encore que quoi que nous fassions nous allons connaître une hausse de température de 0,5 à 1 °C. Que signifient au juste ces chiffres, et de combien la planète pourrait s'échauffer ?

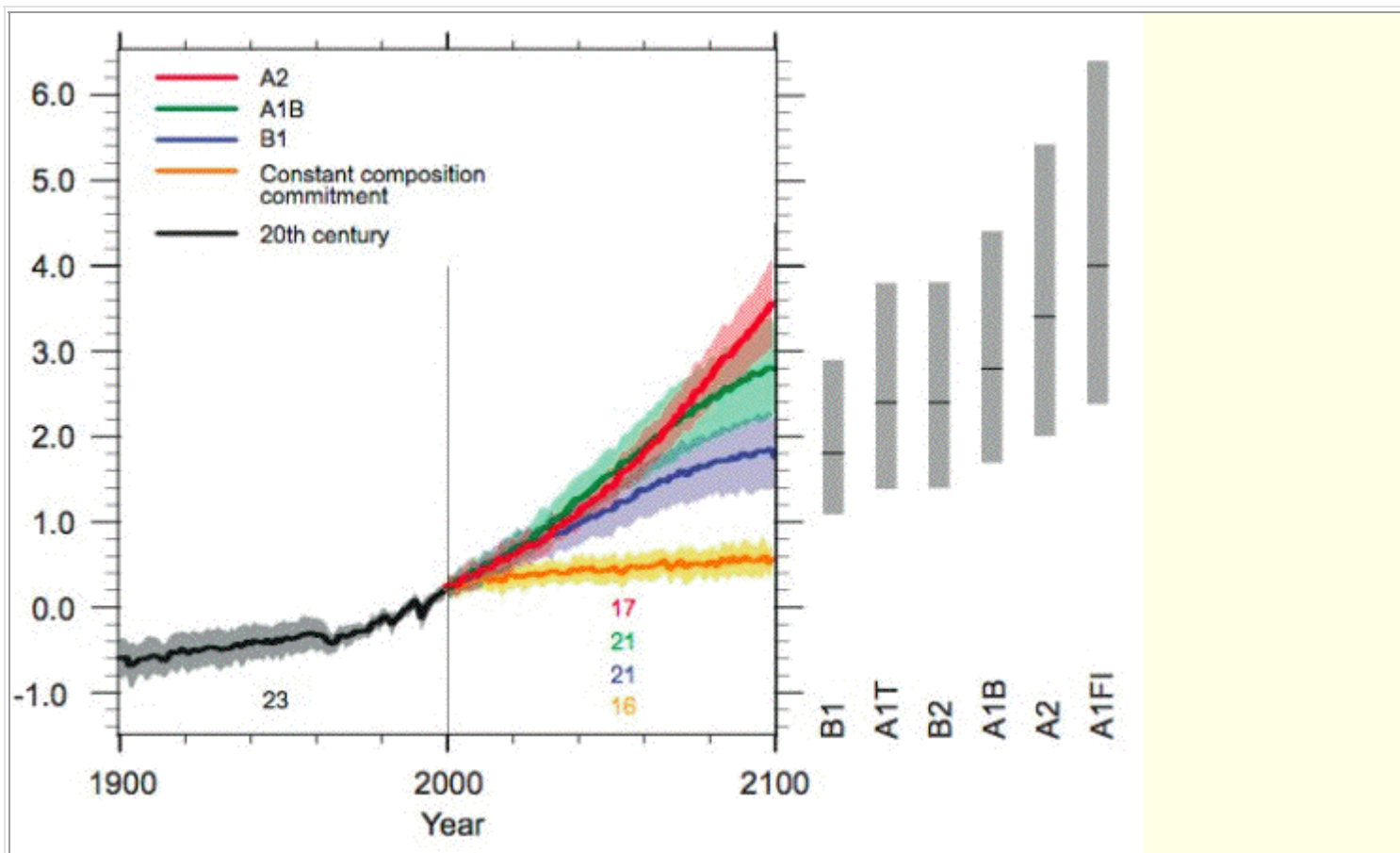
La réponse est que... cela dépend. Cela dépend tout d'abord de ce que nous allons émettre comme gaz à effet de serre à l'avenir. En effet, une simulation climatique est en fait une fusée à 3 étages, dont la partie "climat" n'est que le troisième.



asservi.

Par la force des choses, le résultat à l'arrivée dépend donc du scénario d'émission : cela n'a pas de sens de mentionner une élévation de température donnée sans faire référence au scénario d'émission qui va avec. C'est peut-être un peu compliqué, mais c'est comme cela !

Avec les [modèles](#) utilisés par les physiciens et [les scénarios retenus](#) la fourchette des "valeurs les plus probables" est alors de 2 à 4°C, en chiffres ronds, mais il faut bien comprendre ce que cela recouvre.



Prédictions de l'augmentation de la température moyenne de surface entre 1990 et 2100 selon les scénarios. Chaque scénario d'émission de gaz à effet de serre (designé par un sigle : A1B, B1, etc) a une couleur différente et correspond à des hypothèses différentes.

Pour une couleur donnée, donc un scénario donné, la ligne continue donne la valeur la plus probable de l'élévation de température de 2000 à 2100. Cette "valeur la plus probable" est en fait une moyenne inter-modèles (le nombre de modèles concernés est indiqué avec un nombre de même couleur que la courbe

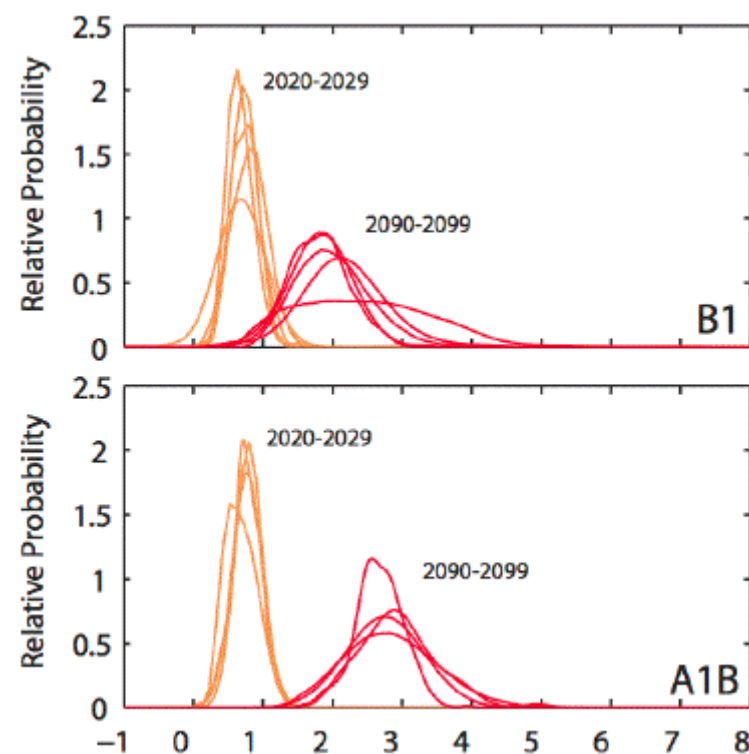
du scénario). Par exemple le scénario A1B, en vert, conduit à une élévation de température de presque 3°C en 2100 en valeur la plus probable.

La zone grise sur la droite, portant le même sigle que la courbe, représente la fourchette possible pour l'élévation de température si on prend en compte tous les modèles. Par exemple le scénario B1 conduit à une élévation "la plus probable" de presque 2°C en 2100, mais la fourchette des valeurs vraisemblables va de 1,2 à 2,9 °C (on parle de "dispersion" des résultats).

Ces valeurs ne font que confirmer celles du rapport de 2001 du GIEC, ce qui est en soi un résultat très fort (hélas serait-on tenté de dire).

Source : [GIEC](#), Summary for Policymakers of the 4th assessment report (working group 1), 2007

En fait, ce que l'on appelle "augmentation de la température moyenne", dans une simulation climatique, n'est que la "valeur la plus probable" de l'élévation de température moyenne au niveau du sol. Plus précisément, quand on augmente délibérément la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère dans un modèle de climat, ce dernier répond - pour les versions les plus avancées - de manière probabiliste. Ce qu'il dit, en clair, est que pour tant de gaz à effet de serre en plus, il y a une probabilité de X% pour que la température moyenne en 2100 augmente de 1°C au moins, une probabilité de Y% pour que la température moyenne en 2100 augmente de 2 °C au moins, etc. Bien sûr, cette probabilité est de 100% pour une fraction de degré (la probabilité pour que la température moyenne augmente d'au moins 0,5 °C d'ici à 2100 est de 100% : c'est un événement certain dans tous les cas de figure), et devient nulle pour une élévation de température suffisamment élevée (la probabilité pour que la température moyenne augmente d'au moins 10 °C d'ici à 2100 avec le scénario B1 est de 0% : c'est un événement impossible dans tous les cas de figure). L'encadré ci-dessous précise un peu cette approche (pardon pour ceux que le terme "distribution des probabilités rebute !).



Les graphiques ci-dessus donnent, pour 2 scénarii (B1, A1B), les distributions de probabilité fournies par les modèles pris en compte pour l'élévation de température moyenne à l'avenir. Les courbes oranges de gauche (une courbe par modèle) concernent l'élévation de température en 2020-2029 par rapport à 1980-1999, les courbes rouges de droite (une courbe par modèle) concernent l'élévation de température en 2090-2099 par rapport à 1980-1999. Ces courbes s'interprètent de la manière suivante :

- pour chaque modèle (une courbe) l'élévation de température la plus probable est celle du sommet de la courbe,
- quand la courbe touche le zéro c'est que l'événement devient impossible (par exemple aucun modèle

n'envisage une élévation de température moyenne supérieure à 5°C en 2100 pour le scénario B1),

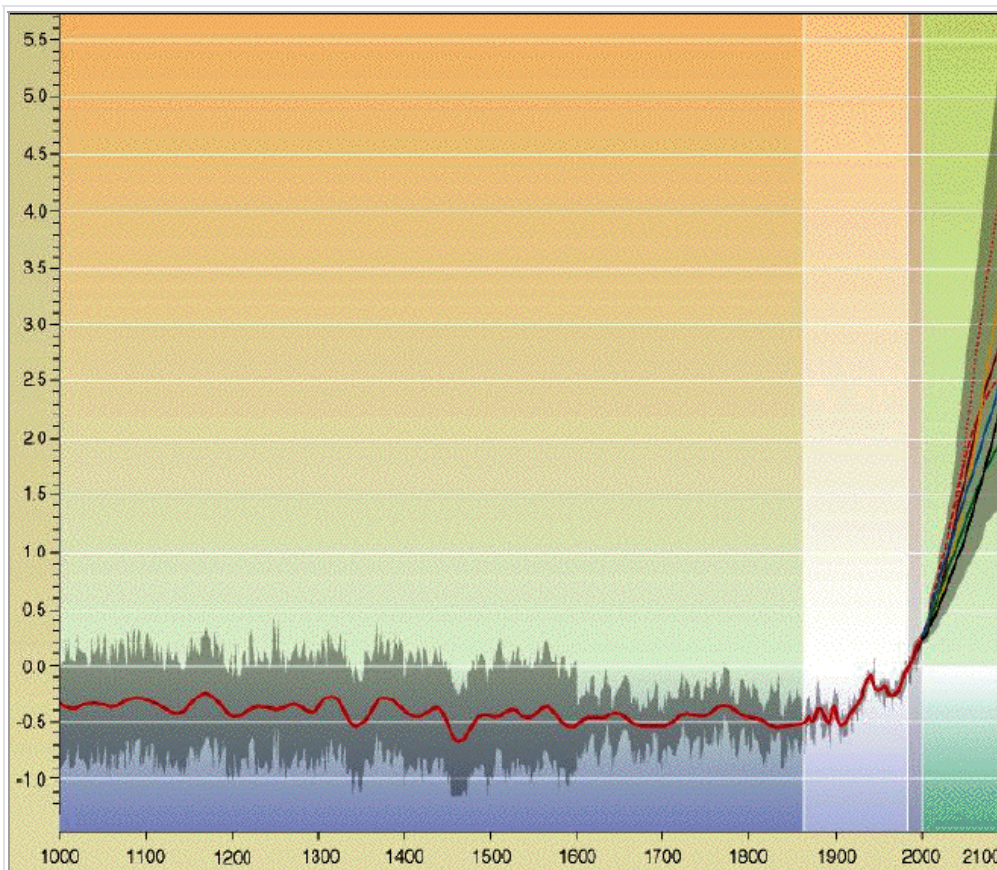
► pour chaque valeur T de l'axe horizontal, la surface sous la courbe jusqu'à la valeur en question donne la probabilité que la température moyenne soit au plus T.

► ainsi, pour le même scénario B1, l'élévation la plus probable est d'environ 2 °C, mais il y a une probabilité non nulle que ce soit 3 °C pour un certain nombre de modèles, et même 4°C supplémentaires restent possibles pour l'un d'entre eux.

NB : aucune de ces simulations ne sont [couplées avec le cycle du carbone](#).

Source : [GIEC](#), Summary for Policymakers of the 4th assessment report (working group 1), 2007

Si nous mettons cette élévation possible au 21^è siècle avec les températures du passé proche, une chose est manifeste : dans tous les cas de figure l'évolution de la température est extrêmement brusque, voire brutale (ci-dessous), par rapport aux évolutions naturelles, et au 21⁷ siècle nous aurions une élévation très largement supérieure à celle du 20^è siècle. Cela signifie notamment que l'essentiel des conséquences d'un changement climatique amples sont à venir, et non déjà visibles. La question majeure est bien de savoir comment éviter de "prendre" quelques degrés, non de savoir si [l'homme est responsable à 23,5% ou à 38,3% de ce qui s'est passé au 20^è siècle](#) !



Mise en perspective de la température reconstituée ou mesurée, de l'an 1000 à l'an 2000, et des élévations possibles au 21^è siècle. En fait ce qui est représenté n'est pas la température moyenne de la planète, mais la différence de cette température moyenne avec la moyenne de l'année 1990. Par exemple, en l'an 1860, il a fait 0,5 °C de moins (moyenne mondiale) qu'en 1990.

La température des années 1000 à 2000 est matérialisée par la courbe rouge. La zone grisée représente la marge d'incertitude pour les périodes anciennes, pour lesquelles les températures ne sont pas mesurées - il n'y avait pas de thermomètres partout à ces époques ! - mais reconstituées à partir de

prélèvements, dans la glace, les fonds marins, les coraux, les troncs d'arbre....

Pour les années 2000 et au-delà, le graphique représente la réponse donnée par [les modèles](#), en fonction des [scénarios d'émission](#) de gaz à effet de serre pour le 21^è siècle . Chaque courbe de couleur correspond à un même scénario, appliqué à un ensemble de 15 modèles différents, et dont on a représenté la moyenne tous modèles confondus. L'enveloppe marron matérialise les extrêmes, c'est à dire l'écart entre la plus petite élévation, pour les émissions les plus faibles et le modèle le moins "réactif", et l'élévation maximale, obtenue avec le scénario "haut" pour les émissions et le modèle le plus "réactif".

Attention ! Ce graphique date du rapport 2001 du GIEC et les couleurs des scénarios ne sont pas les mêmes que sur les graphiques du rapport 2007 (pas terrible question cohérence !).

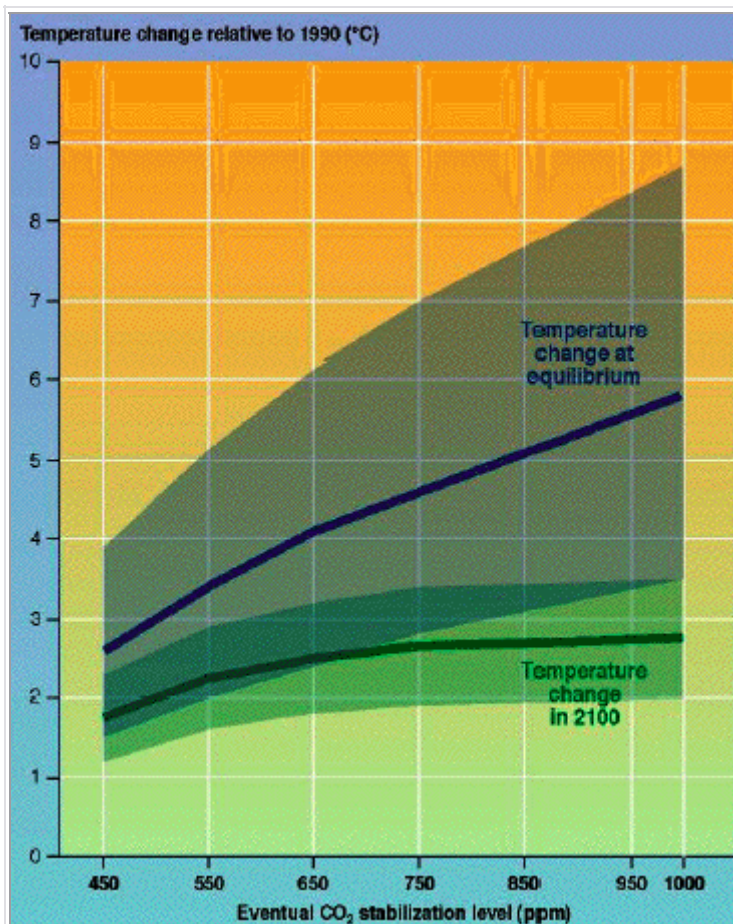
Dans tous les cas de figure, l'évolution est beaucoup plus brutale que ce à quoi la variabilité naturelle du climat nous a habitués. Et ces projections ne tiennent pas compte du possible [dérèglement du cycle du carbone](#).

Source : [Climate Change 2001](#), the scientific basis, [GIEC](#), 2001

Et que se passe-t-il au-delà de 100 ans ? Le climat célèbre-t-il l'année 2100 à sa manière en retournant à un état normal ? Malheureusement non : les [gaz à effet de serre](#) ont une durée de séjour très longue dans l'atmosphère, et donc la perturbation du climat que nous avons mise en route [va se poursuivre pendant des milliers d'années de toute façon](#), avec, par contre, une ampleur qui dépend encore de ce que nous allons émettre comme gaz à effet de serre au cours du 21^è siècle, comme le graphique ci-dessus le montre bien.

Et, hélas, même en cas de suppression totale des émissions demain matin, les concentrations - et donc "l'effet de serre" lié à ces gaz que nous avons mis dans l'atmosphère - ne décroîtraient que très lentement, et même avec une hypothèse aussi extrême nous ne retrouverons pas le niveau "pré-industriel" avant des dizaines de milliers d'années.

En conséquence, le maximum des températures n'est atteint que bien après que le maximum de concentration en gaz le soit, et **les valeurs atteintes en 2100 pour les divers scénarios d'évolution ne représentent que 50% environ du maximum absolu à venir ultérieurement** (cf. figure ci-dessous).



Ce graphique représente, selon la concentration de l'air en CO₂ au moment où cette dernière cessera d'augmenter (nous sommes actuellement à 380 et sommes partis pour bien plus), la

fourchette d'élévation de température en 2100 comparée à la fourchette "à terme".

Par exemple, si nous parvenons à stabiliser la contration atmosphérique en CO₂ à 750 ppm d'ici quelques siècles (ce qui est énorme), l'élévation de température en 2100 oscillera (avec le modèle utilisé ici) entre 2 et 3,5 °C (attention : ici nous ne sommes pas à 750 ppm en 2100, mais à terme), et celle à terme (quelques siècles plus tard) serait comprise entre 2,7 et 7°C.

On voit donc facilement que **la température continue d'augmenter bien après 2100, et que l'augmentation résiduelle est d'autant plus forte que l'augmentation prévue à la fin du 21^e siècle** (les journaux ne parlent que de celle-là) **est déjà importante.**

Il est aussi facile de voir que l'élévation de température à terme pourrait être le triple de celle en 2100 : les ennuis ne seront pas terminés en 2101...

Source : [GIEC](#), 2001

Si l'on regarde ce que donnent les modèles non plus sur 1 siècle mais sur une durée plus longue (quelques siècles), l'augmentation de température pourrait fort bien dépasser 10°C lorsque le maximum sera atteint (dans l'hypothèse haute où nous émettrions des quantités sans cesse croissantes de gaz à effet de serre pendant le siècle à venir).

Bien sur le [modèle](#) ne reste pas forcément valable pendant des siècles, mais on peut alors raisonner de la manière suivante :

➤ soit notre système climatique reste à peu près ce qu'il est avec une telle augmentation de température. La prolongation du modèle, qui représente le système climatique, est donc valide à cette échéance, et un tel maximum n'est pas à exclure. Les [conséquences possibles](#) engendrées par une telle augmentation - que la terre n'a probablement jamais connue depuis qu'elle héberge de la vie - en un laps de temps si court **ne permettraient vraisemblablement pas le maintien de notre forme actuelle de civilisation et la vie confortable - voire la survie pour une partie - de quelques milliards d'hommes sur la Terre.**

➤soit le système climatique se modifie profondément bien avant, par suite d'une modification brutale d'une de ses composantes (voir [risques](#) et [puits](#)). Du coup le modèle, qui représente le système actuel, n'est plus valide, et nous entrons alors dans l'inconnu, qui peut être plus agréable, mais aussi... [encore plus désagréable](#) que ce que prévoit le modèle.

Il faut rappeler que nous n'avons [aucune visibilité historique](#) (donc aucun moyen de savoir ce qui se passe en pareil cas) concernant une élévation rapide de température de quelques degrés au-dessus des températures actuelles.

Où nous situons-nous dans l'échelle des températures par rapport au passé ?

dernière version : novembre 2004

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Tous les passés ne sont pas d'un intérêt équivalent pour deux raisons :

➤tout d'abord le phénomène qui nous intéresse maintenant se situe sur une échelle de temps très courte en regard de l'âge de notre planète : un siècle, cela fait 0,0000025% de l'âge de la Terre ! Or si l'on peut avoir une bonne idée des conditions moyennes qui régnaient à la surface de la Terre il y a longtemps, on ne sait pas comment les choses évoluaient sur un siècle à cette époque là. Par exemple, on ne sait pas distinguer ce qui s'est passé entre -60.000.000 ans et -60.000.100 ans (ou entre -60.000.000 ans et -59.999.900 ans).

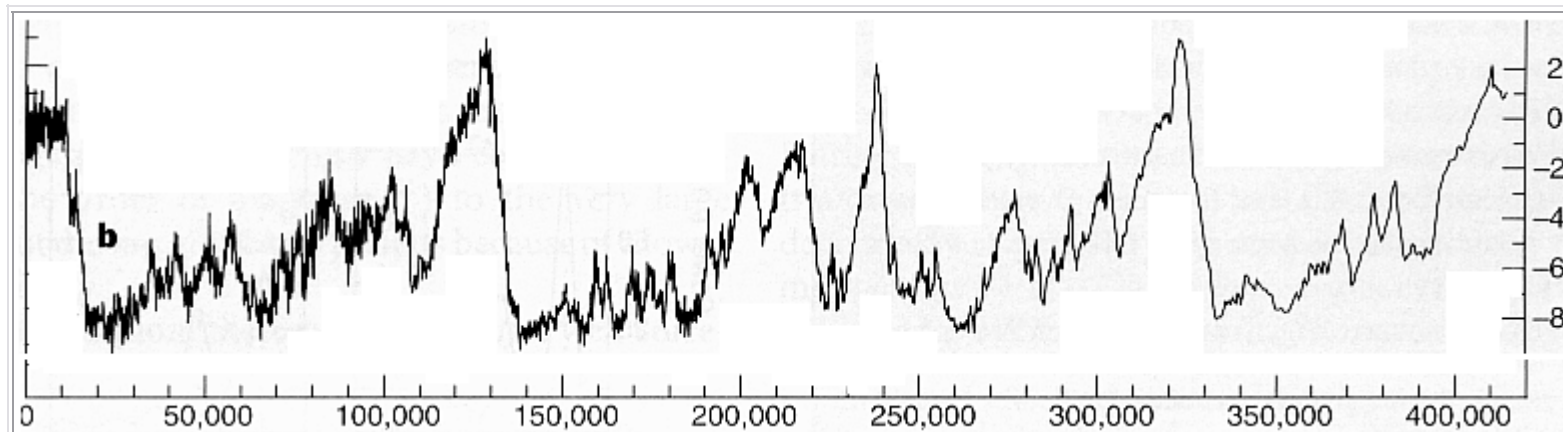
➤Comme nous nous intéressons essentiellement à la survie et au confort de notre propre espèce (s'intéresser à la survie du reste n'a de sens que si nous sommes toujours là : sur une planète d'où les hommes auraient disparu, le fait de savoir si il resterait des tigres est une question un peu secondaire !), ce qui s'est passé avant l'apparition de l'homme est moins intéressant que ce qui s'est passé après.

Nous avons vu qu'en effectuant des forages dans les glaces polaires, il était possible de "consulter les archives" avec une précision acceptable pour les 400.000 dernières années. Cette période est déjà suffisamment riche en enseignements.

Les cycles

Durant ces 400.000 dernières années, et pendant toute l'ère quaternaire, la cause première des variations du climat n'a rien à voir avec l'humanité, si l'on excepte le dernier siècle et demi bien sûr. A l'échelle planétaire, le climat a surtout ressenti la [variation cyclique de certains paramètres astronomiques de la Terre](#), qui ont modifié la quantité de rayonnement que notre planète reçoit du soleil.

Sur les 400.000 dernières années, ces variations astronomiques ont produit 4 **cycles à peu près identiques**, d'un peu plus de 100.000 ans chacun, pendant lesquels il a fait assez froid pendant presque 100.000 ans (température moyenne de la planète inférieure de 5° C à maintenant) puis nettement plus chaud (température moyenne de l'ordre de ce que nous connaissons maintenant) pendant 10 à 20.000 ans (figure ci-dessous).



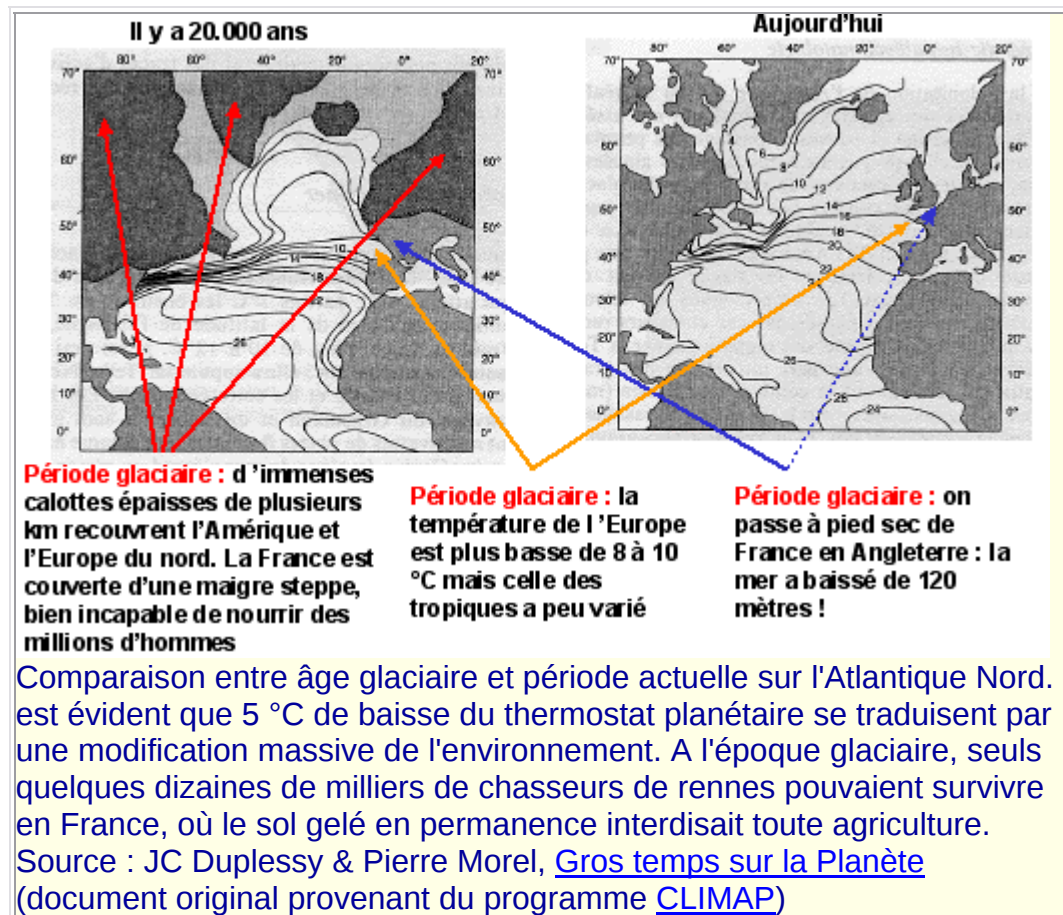
Evolution, sur les 400.000 dernières années, de la température moyenne de l'Antarctique. Le 0 de l'axe vertical de droite correspond à la valeur actuelle. Cette variation de température est légèrement plus élevée que celle de la planète dans son ensemble. Source : Petit & al., Nature, Juin 1999

Attention ! cette courbe se lit à l'envers : plus on va vers la droite, plus on remonte dans le temps. Le fait que les oscillations soient plus importantes à gauche (donc récemment) tient à la meilleure précision des mesures quand on se rapproche de l'époque contemporaine. Source : [LSCE](#)

En particulier, sur les 400.000 dernières années, le maximum de la moyenne annuelle de la température est de 1 à 2°C au dessus de la moyenne actuelle (16 à 17 °C au lieu de 15) ; la dernière fois était il y a 130.000 ans.

On tire quelques conclusions importantes de ce qui précède :

- Nous sommes déjà dans une période chaude pour l'histoire "naturelle" de notre climat. En toute bonne logique, nous devrions approcher de la fin d'une période interglaciaire et le climat devrait avoir naturellement tendance à se refroidir.
- Toutefois un refroidissement ne se fait pas en un siècle, même si la courbe ci-dessus a l'air "pentue" lorsqu'un refroidissement démarre. Le rythme des évolutions les plus rapides sur la courbe ci-dessus est en effet de quelques degrés en.....5 à 10.000 ans, alors que les modèles nous prévoient une évolution de....quelques degrés en 1 siècle. C'est 50 à 100 fois plus rapide.
- Une différence de quelques degrés de température moyenne n'est pas un changement mineur, loin s'en faut : avec 5 °C en moins, le niveau de la mer avait baissé de 100 mètres environ (on passait à pied sec de France en Angleterre) et l'Europe du Nord était recouverte d'un énorme glacier.



➤ Comme on n'a jamais vu 5 °C en plus pendant l'histoire récente, **on n'a aucune idée de ce qui peut se passer avec une telle augmentation de température en dehors de ce que racontent les modèles**, mais à l'évidence il s'agirait d'une modification majeure de notre environnement, et non d'une promenade de santé. A cause de ce caractère inédit, qui empêche de savoir très à l'avance ce qui pourrait se passer, il est même possible d'affirmer que nous allons avoir essentiellement des surprises, probablement plus souvent mauvaises que bonnes.

Et avant ?

Après la formation de la terre, l'atmosphère primitive qui est apparue sur notre planète, essentiellement comme conséquence du volcanisme (lui-même conséquence de l'énergie libérée au sein de la planète par la radioactivité naturelle des roches, alors beaucoup plus élevée qu'aujourd'hui), et du bombardement de la terre par des corpuscules riches en eau, comportait essentiellement du CO₂ et de la vapeur d'eau. Les planètes du même type que la terre (on parle de planètes telluriques, par opposition aux planètes géantes telles Jupiter et Saturne, qui sont des étoiles avortées), qui ont une atmosphère, mais qui n'ont jamais porté la vie (en l'occurrence il s'agit de Mars et Vénus), ont une composition de leur air qui est toujours très voisine de celle de l'atmosphère terrestre primitive, avec essentiellement du CO₂.

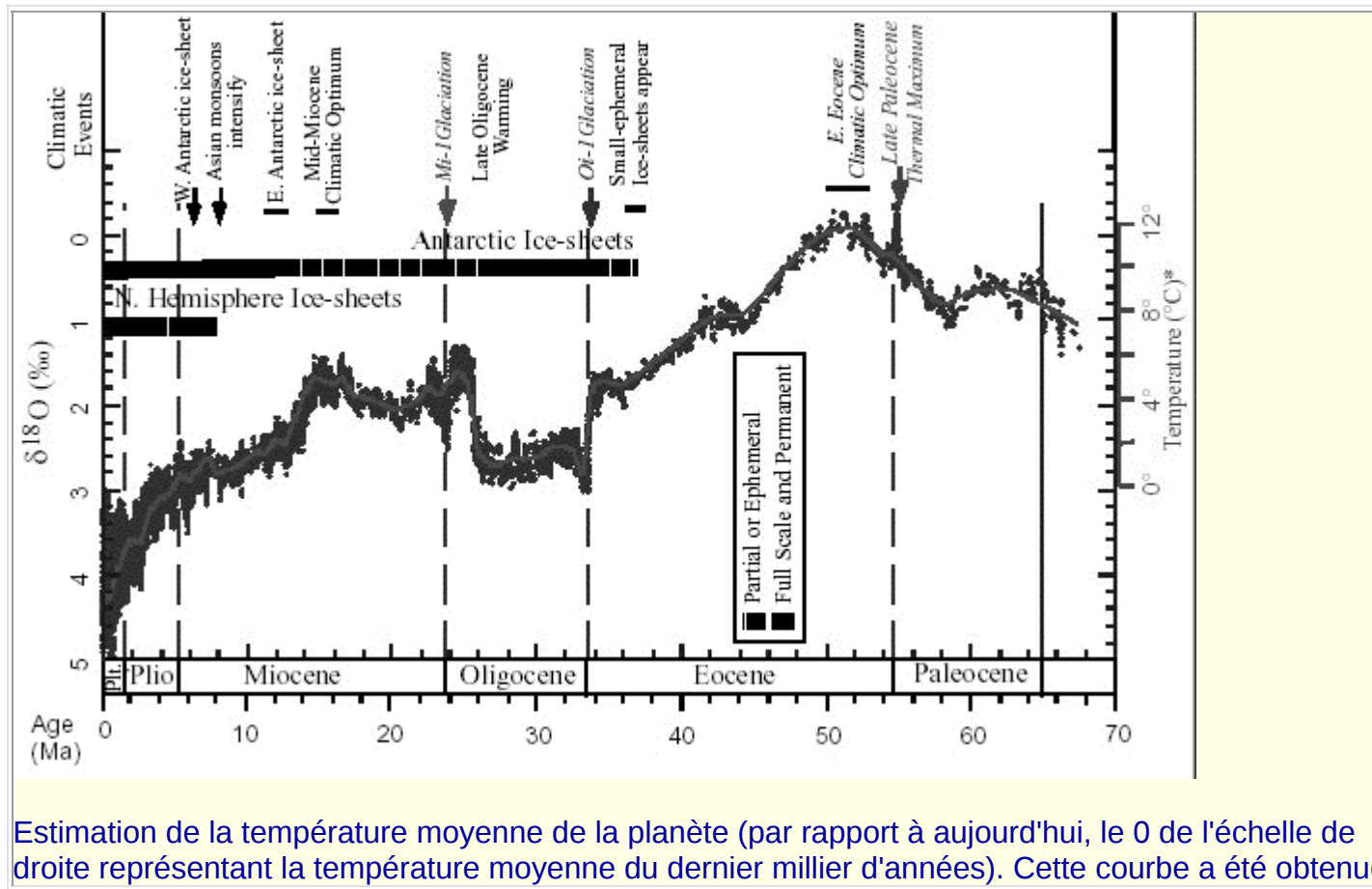
Avec beaucoup plus de CO₂ dans l'atmosphère terrestre il y a quelques milliards d'années, l'[effet de serre](#) était donc bien plus important qu'aujourd'hui. Par contre, il y a quelques milliards d'années, le Soleil n'était pas été aussi puissant qu'aujourd'hui, de telle sorte que la température terrestre n'était pas trop élevée pour permettre l'apparition de la vie. Le processus remarquable qui a fait que le CO₂ a ensuite baissé en même temps que la puissance du soleil augmentait, et donc que la température de surface de la planète est restée dans des limites compatibles avec la vie, c'est justement... la vie elle-même.

En effet, l'apparition dans l'océan, il y a presque 4 milliards d'années, d'algues primitives, aptes à faire de la photosynthèse, a permis l'existence d'une vie végétale marine qui a progressivement supprimé une grande part du CO₂ de l'atmosphère, qui se retrouve aujourd'hui dans le calcaire, c'est à dire les restes fossiles (les coquilles) de micro-organismes passés (une toute petite partie a aussi [donné le pétrole et le gaz](#), mais c'est ridicule à côté du calcaire). En même temps, cette photosynthèse enrichissait l'atmosphère en oxygène, qui en compose aujourd'hui 20%, et qui ne pourrait rester à un tel niveau sans vie. C'est également la vie qui a permis l'apparition d'azote libre dans l'air que nous respirons aujourd'hui.

Si nous revenons à notre problème de température, il n'est bien sûr pas facile de "deviner" ce qu'elle pouvait être à des époques aussi lointaines. La température qui régnait à la surface il y a 3 milliards d'années, par exemple, ne peut pas se déduire de mesures de manière commode, car l'essentiel de ce qui existait alors a depuis été enfoui au moins une fois dans les entrailles de la terre à cause de la tectonique des plaques, ce qui a quelque peu perturbé l'information qui aurait pu être obtenue ! Pour les fonds

marins, par exemple, il n'est pas possible d'obtenir des sédiments âgés de plus de 150 millions d'années : passé ce laps de temps, ils ont été enfouis dans la croûte terrestre par les mouvements de cette dernière.

Il est cependant possible de regarder comment la température a évolué depuis la disparition des dinosaures, à la fin de l'ère secondaire, il y a 67 millions d'années, et il semble qu'il ait fait généralement plus chaud que maintenant, avec une moyenne qui a pu être jusqu'à 10 °C plus élevée qu'aujourd'hui. Mais la variation ne s'est pas faite sur un siècle !



par l'analyse de sédiments océaniques prélevés dans 40 lieux différents. L'axe horizontal du bas donne l'ancienneté par rapport à aujourd'hui, en millions d'années. Attention ! Une graduation de l'axe du bas fait 2 millions d'années, et l'époque est d'autant plus ancienne que l'on va vers la droite.

Rappelons que la moyenne planétaire est aujourd'hui de 15 °C, mais que si nous faisons la moyenne sur le dernier million d'années nous obtiendrons quelque chose de plus proche de 11 ou 12 °C, car la terre a été en période glaciaire l'essentiel du dernier million d'années.

Source : Zachos et al., Science, 2001

Voici encore un élément qui renforce l'idée qu'une élévation de température dépassant 5°C en un ou deux siècles serait lourde de menaces : au regard des variations de la température planétaire sur des périodes longues, il s'agirait d'une déstabilisation très brutale.

Pour en savoir plus sur l'histoire de la Terre : le [site \(remarquable\) de Pierre-André Bourque](#), professeur à l'Université Laval au Canada

Les températures et les précipitations vont-elles évoluer partout de la même manière ?

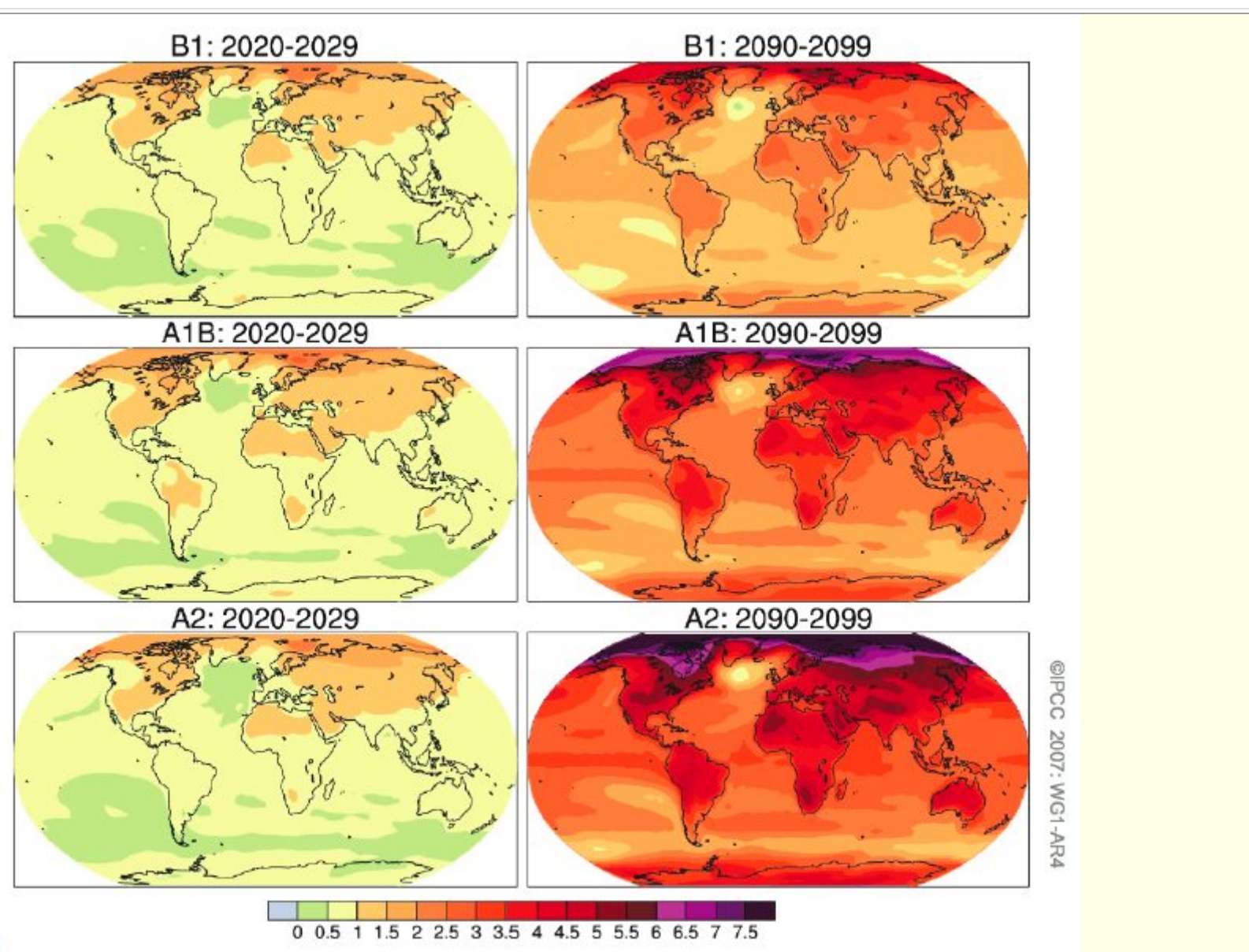
dernière version : février 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Il est courant de confondre météo et climat, c'est-à-dire de penser qu'une augmentation de 3 °C de la température moyenne signifie +3°C à Paris comme à Tombouctou ou à Vladivostok, +3°C l'hiver comme l'été, la nuit comme le jour, bref que cette hausse va être homogène dans le temps et dans l'espace, avec du coup une adaptation qui sera facile. Or, si l'on se réfère au passé, il va se passer l'exact contraire : la hausse ne sera pas homogène dans l'espace, ni dans le temps, et de multiples [effets de seuil](#) pourraient se produire.

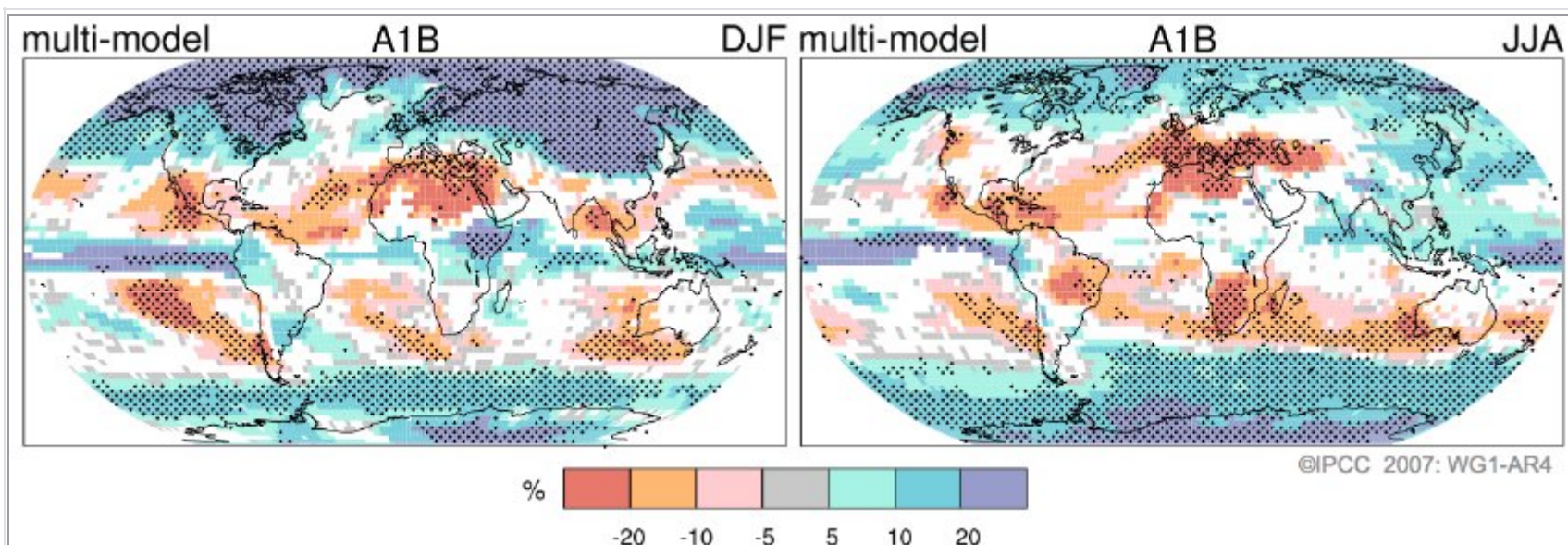
Par exemple, [lors des dernières glaciations](#), la température moyenne de l'atmosphère terrestre au niveau du sol était inférieure de 4 à 5 °C à la moyenne actuelle, mais la moyenne française était inférieure de 10°C à ce qu'elle est aujourd'hui (et au Groenland c'était -20°C), pendant que certaines zones tropicales avaient des températures moyennes à peu près identiques à ce qu'elles sont maintenant.

Si l'on en croit les modèles, que l'on a [aucune raison de ne pas croire](#) dans les grandes lignes, il est tout aussi peu probable que la hausse soit homogène à l'avenir.



Elévations régionales de température moyenne par rapport à la période 1980-1999 pour la décennie 2020-2029 (à gauche) et pour la décennie 2090-2099 (à droite). Il s'agit d'une moyenne inter-modèles, établie à partir des sorties de 6 à 8 modèles. Ces élévations sont données, de haut en bas, pour trois scénarii différents, B1, A1B et A2, soit en gros des émissions stables, qui doublent, et qui sont multipliées par 4 (voir descriptifs sur la [page sur les scénarii](#)).

Par ailleurs, les modèles s'accordent pour dire que les modifications des moyennes de températures seront très différentes selon que l'on se situera en été ou en hiver. Et ce qui est vrai pour les températures sera aussi vrai pour les précipitations, à savoir que l'évolution globale sera répartie de manière hétérogène à la surface du globe et selon les saisons.

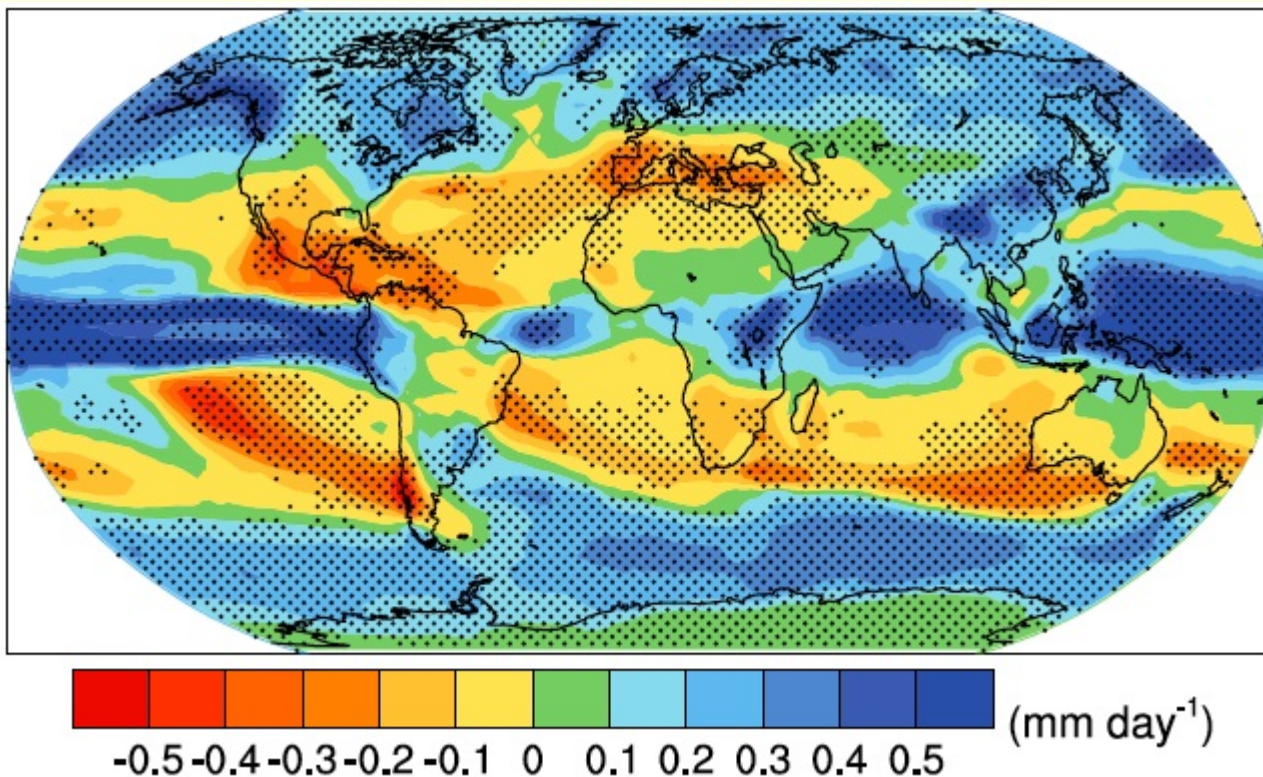


Moyenne inter-modèles des évolutions régionales des précipitations moyennes pour Décembre - Janvier - Février (DJF) et pour Juin-Juillet-Août (JJA) pour la période 2090-2099 par rapport à la période 1980-1999, avec un [scénario d'émission](#) qui est le A1B (en gros les émissions doublent au cours du 21^è siècle).

Les zones blanches correspondent à une absence de concordance significative entre modèles (impossible de dégager une tendance) et les zones avec pointillés correspondent à l'inverse à un consensus presque parfait (plus de 90% des modèles concordent sur le signe de l'évolution). Par exemple l'assèchement du pourtour du bassin méditerranéen pour l'été (chez nous) correspond à une tendance observée dans plus de 90% des simulations.

Il est aisé de constater que les évolutions peuvent beaucoup varier selon la saison. On notera aussi une excellente nouvelle pour notre pays : parmi les zones qui s'assèchent le plus l'été on trouve... la France, et cela reste valable en

moyenne annuelle (ci-dessous).



Moyenne inter-modèles des évolutions régionales des précipitations sur l'ensemble de l'année, en mm/jour de différence entre la période 2080-2099 et la période 1980-1999, avec un [scénario d'émission](#) qui est le A1B (en gros les émissions doublent au cours du 21^e siècle). Tout le pourtour du bassin méditerranéen va globalement s'assécher, de même que l'Amérique Centrale, le Sud du Chili, et le sud de l'Australie. Les régions surchargées avec des pointillés noir correspondent aux régions où 80% des simulations sont concordantes en signe et en amplitude. NB : Une variation de 0,5 mm/jour signifie environ 150 mm d'eau en plus ou en moins sur l'année, soit entre le quart et le cinquième de ce qui tombe sur l'essentiel des régions européennes et méditerranéennes.

Source : [GIEC](#), 4th assessment report (working group 1), 2007

Sans même quitter le domaine des températures ou des précipitations, il est donc facile de voir que le terme de "changement moyen" ne reflète pas du tout les évolutions régionales, qui pourront s'écarter plus ou moins significativement de l'évolution moyenne.

Qu'est-ce qu'un scénario d'émission de gaz à effet de serre ?

dernière version : août 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Lorsque la presse - ou un individu qui s'exprime sur le sujet - mentionne l'[élévation de température globale](#) que le monde pourrait connaître au XXI^e siècle comme conséquence de nos émissions de [gaz à effet de serre](#), la fourchette de températures qui est mentionnée depuis 2001 est de 1,4 à 5,8 °C, et il est habituel de penser que ce très large écart (5,8 °C, c'est presque quatre fois plus que 1,4 °C !) reflète uniquement la connaissance approximative que [les scientifiques](#) ont du système climatique et de sa [réaction future](#) à notre comportement.

En gros, a-t-on coutume de penser, si nous ne savons pas dire si cette élévation sera de "seulement" 1,4 °C ou de près de 6 °C en 2100, c'est que le monde qui nous entoure est encore fort mal connu ; nous serions tellement ignorants de la manière dont se comporteront les courants marins, les calottes polaires, les puits de carbone, etc, que tout pronostic serait extrêmement incertain. Quelques "[sceptiques](#)" ne manquent pas de s'appuyer sur cet argument.

En fait, cette idée *a priori* n'est que partiellement vraie, et par voie de conséquence elle est aussi partiellement fausse (bravo M. La Palisse !). L'existence d'une fourchette aussi importante tient pour l'essentiel à deux facteurs, dont l'un seulement reflète une aptitude imparfaite à reproduire sur ordinateur le monde qui nous entoure :

► la représentation des [nuages](#) dans les [modèles climatiques](#) est encore très approximative. Les nuages ont deux effets antagonistes sur la température au sol : composés de vapeur (et de gouttes) d'eau, qui est un [gaz à effet de serre](#), il participent au [piège à chaleur](#), mais présentant des surfaces très réfléchissantes aux rayons du soleil, ils ont aussi un effet "refroidissant" sur le

climat, en empêchant une partie de l'énergie solaire de parvenir jusqu'au sol. La manière dont le changement climatique modifiera ces deux effets contraires à l'avenir n'est pas connue de manière fine, car les nuages ne sont pas explicitement représentés dans les modèles (c'est à dire les processus de petite échelle responsables des nuages ne sont pas traités un par un, mais de manière globale). Cette manière approximative de faire engendre bien sur une imprécision, qui est de l'ordre de 1,5 à 2 °C sur une prédiction de température moyenne à 100 ans,

► Mais une deuxième source de fluctuation, que nous allons développer ici, est tout simplement que l'état de la planète en 2100 dépend certes de ce que nous avons déjà mis comme [gaz à effet de serre](#) dans l'atmosphère jusqu'à maintenant, la durée de vie de ces gaz étant de l'ordre du siècle, mais aussi, **et surtout**, de ceux que nous allons mettre à partir d'aujourd'hui et jusqu'en 2100. Et le comportement à venir des sociétés humaines, bien malin qui peut le prédire de manière fiable !

Les scientifiques travaillent donc avec des [scénarios d'émission](#), qui décrivent chacun comment pourraient évoluer les émissions de gaz à effet de serre entre 2000 et 2100 selon des hypothèses diverses. Ces scénarios sont indispensables pour pouvoir comparer entre eux les résultats des divers [modèles](#), en regardant quels sont les différents résultats (selon les modèles) avec les mêmes hypothèses. En effet, comparer entre eux des résultats de modélisations faites avec des scénarios d'émission différents revient un peu à comparer 3 devis pour des travaux qui porteraient l'un sur notre salle de bains, le deuxième sur une chambre chez le voisin, et le troisième sur la cave de l'école !

Comme il y a une infinité de possibilités *a priori* pour décrire ce que seront les émissions à l'avenir, **les scénarios sont nécessairement conventionnels**. Cela ne signifie pas qu'ils sont totalement arbitraires pour autant, bien sur : chacun d'entre eux reflète un état **plausible** du monde futur, en ce sens qu'il n'est pas possible, aujourd'hui, de dire qu'ils sont totalement impossibles, même si certains d'entre eux peuvent sembler "extrêmes". Les scénarios d'émission ne sont pas faits par les climatologues, mais par d'autres personnes (des démographes, des spécialistes de l'énergie, des sociologues, des économistes...). Ces scénarios n'ont toutefois **ni la prétention de couvrir toute la palette des possibilités**, ni celle de proposer une hiérarchie, c'est à dire que **leurs auteurs se refusent à dire si certains sont plus probables que d'autres**.

Certes, certains de ces scénarios supposent des disponibilités en combustibles fossiles qui sont peut-être exagérément optimistes, ou d'autres un développement du nucléaire qui n'est peut-être pas réaliste, et d'autres encore une surface forestière en 2100 qui peut sembler surprenante. Le propos ici n'est pas de discuter du réalisme de chaque scénario pris un par un, car aucun argument

ne permettrait de trancher définitivement cet aspect des choses. Je les ai personnellement tous regardés, et si certaines hypothèses prises semblent aujourd'hui "osées", aucun scénario ne peut aujourd'hui être déclaré totalement impossible compte tenu de ce que nous connaissons du monde.

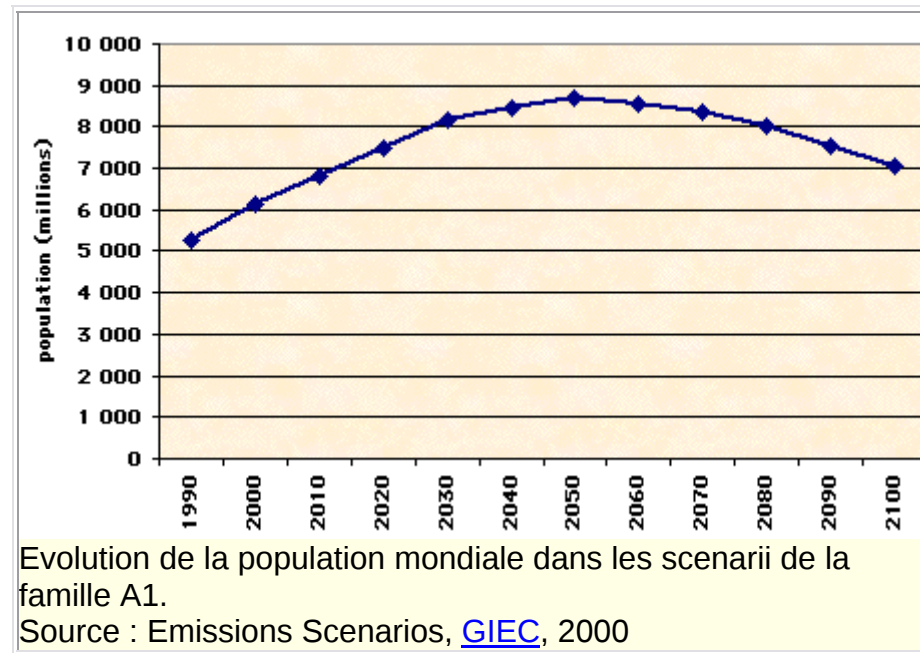
Concrètement le [GIEC](#) a édité un rapport décrivant les 40 scénarios utilisés, qui sont regroupés en 4 grandes "familles". Chaque "famille", désignée par un sigle (A1, A2, B1, B2), est supposée correspondre à un projet de société particulier, et les hypothèses "de base" (portant sur la population, les pratiques agricoles, l'évolution des techniques, etc) servent ensuite à modéliser une consommation d'énergie et une consommation agricole, lesquelles sont ensuite converties en émissions de gaz à effet de serre.

Qu'y a-t-il donc dans la boîte ?

Voici, pour ceux que cela intéresse, ou qui ont la patience de lire, quelques grandes lignes concernant chaque famille de scénarii, et quelques exemples au sein de chaque famille. Toutes ces données sont extraites de "Emissions Scenarios, [GIEC](#), 2000".

➤ La famille A1 correspond aux hypothèses suivantes :

- ▶ la croissance économique est très rapide,
- ▶ la population mondiale culmine en 2050 à près de 9 milliards d'individus puis décroît après (graphique ci-dessous),



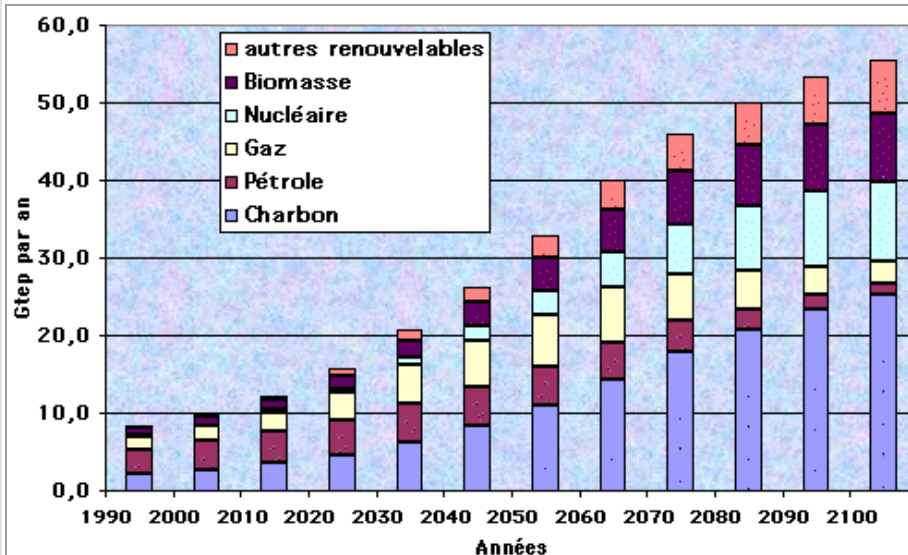
- ▶ la pénétration de nouvelles technologies énergétiquement efficaces est rapide,
- ▶ le revenu par tête et le mode de vie convergent entre régions (c'est à dire que les Chinois, les Indiens, et les Occidentaux se mettent à vivre de manière très similaire),
- ▶ les interactions sociales et culturelles augmentent de manière forte,
- ▶ pour l'énergie, il y a 3 variantes : une utilisation intensive des énergie fossiles (variante A1FI, "FI" signifiant "fossil intensive") ; une utilisation intensive des sources non fossiles (variante A1T) ; un appel aux diverses sources sans en privilégier une en particulier.

Un exemple de scénario de la variante A1FI : A1C-MESSAGE

Un exemple de scénario de la variante A1T : A1T-MARIA

➤ la consommation d'énergie par habitant et par an monte jusqu'à 7,8 tonnes équivalent pétrole en 2100 (moyenne mondiale), ce qui représente 4,9 fois la valeur de 2000, ou encore ce que consomme un Américain aujourd'hui.

➤ la consommation de ressources fossiles par an monte jusqu'à 30 milliards de tonnes équivalent pétrole (en abrégé Gtep) en 2100, soit 4 fois plus qu'aujourd'hui, essentiellement avec du charbon, et la consommation totale d'énergie atteint 55 Gtep, soit 6 fois plus qu'aujourd'hui (graphique ci-dessous).

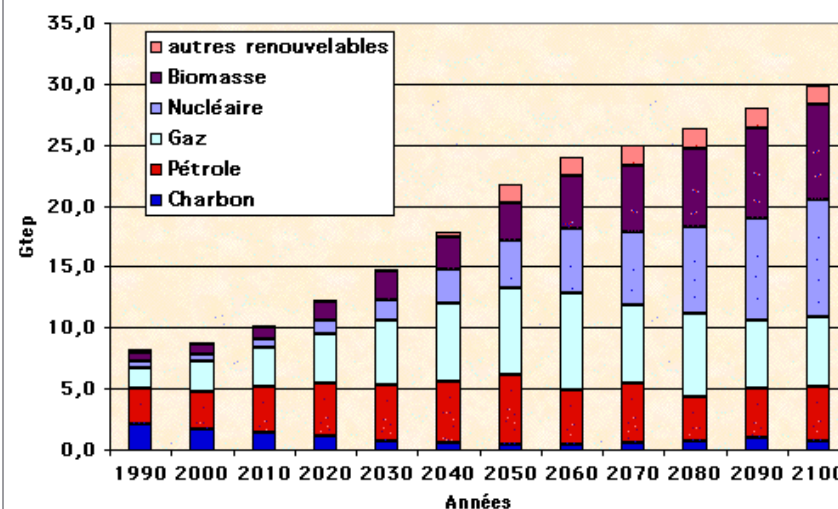


Consommation annuelle d'énergie dans le scénario A1C-MESSAGE

➤ ce scénario conduit à une consommation cumulée de 1.152

➤ la consommation d'énergie par habitant et par an monte jusqu'à 4,2 tonnes équivalent pétrole en 2100 (moyenne mondiale), ce qui représente 3 fois la valeur de 2000 environ, ou encore ce que consomme un Européen aujourd'hui.

➤ la consommation annuelle de l'humanité en ressources fossiles plafonne à 13 Gtep en 2050, soit 50% de plus qu'aujourd'hui, mais la consommation globale d'énergie monte à 30 Gtep, soit un peu plus de 3 fois plus qu'aujourd'hui (graphique ci-dessous).



Consommation annuelle d'énergie dans le scénario A1T-MARIA

Gtep de charbon, soit presque 2 fois les réserves prouvées d'aujourd'hui, mais moins de 50% des ressources ultimes estimées (la réserve est ce que l'on sait que l'on peut déjà extraire aujourd'hui, la ressource ultime est ce que l'on pense que l'on pourra extraire avant épuisement complet, en tenant compte des découvertes futures et de l'amélioration des techniques de récupération, ces deux derniers points étant bien entendu spéculatifs par nature).

➤ Ce scénario consomme également 440 Gtep de pétrole en un siècle (les ressources ultimes estimées sont aujourd'hui de l'ordre de 450 Gtep en incluant le pétrole non conventionnel) ainsi que 500 Gtep de gaz (ressources ultimes estimées aux alentours de 300-400 Gtep, sans compter les hydrates de méthane).

➤ Ce scénario fait aussi largement appel aux [sources non carbonnées](#) : il suppose par exemple l'existence d'un parc de 12.000 réacteurs nucléaires de 1400 MWe chacun, contre environ 400 en l'an 2000. Il faut aussi exploiter à des fins énergétiques 20% des terres émergées, ou encore 75% de la surface de forêts (supposée la même qu'en 2000), avec une hypothèse de rendement net moyen de 3 tep par hectare de forêt exploitée.

Il s'agit donc d'un scénario qui reste plausible (personne ne peut dire qu'il est totalement impossible) mais qui décrit clairement une hausse très rapide de la consommation d'énergie et un monde poussé pas très loin de ses "derniers retranchements" pour les énergies fossiles (sauf pour le charbon). Avec ce scénario, la concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 avoisine 1100 ppm, soit 3 fois la concentration actuelle en

➤ ce scénario conduit à une consommation cumulée de 105 Gtep de charbon (20% des réserves prouvées), 470 Gtep de pétrole, et 570 Gtep de gaz.

➤ Ce scénario fait lui aussi appel à des [ressources "sans carbone"](#) significatives : un parc de 11.000 réacteurs nucléaires de 1400 MWe chacun en 2100, et l'exploitation à des fins énergétiques de 65% de la surface de forêts (supposée la même qu'en 2000), avec une hypothèse de rendement net moyen de 3 tep par hectare de forêt exploitée.

Il s'agit donc d'un scénario qui est lui aussi plausible, mais qui suppose des ressources additionnelles très significatives en gaz et en pétrole par rapport à ce que nous connaissons aujourd'hui (exploitation des hydrates, taux de récupération sur le pétrole non conventionnel....) et, comme dans l'autre scénario A1 donné en exemple, un développement spectaculaire du nucléaire.

Avec ce scénario, la concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 avoisine 570 ppm, soit un gros 50% en plus d'aujourd'hui en chiffres ronds.

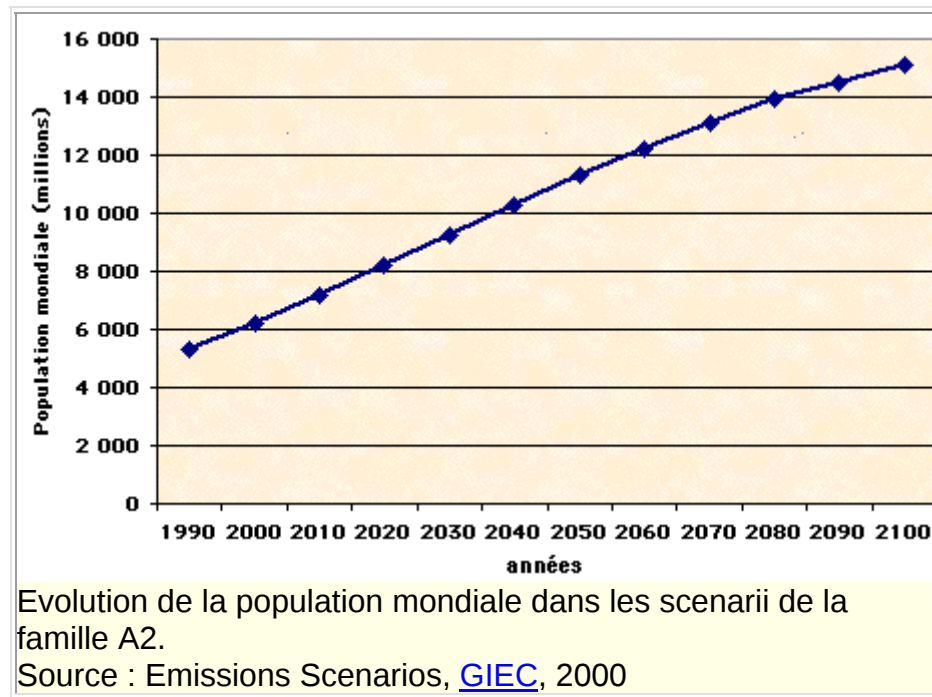
Source : Emissions Scenarios, [GIEC](#), 2000

chiffres ronds.

En fait la "plausibilité" de ce scénario dépend moins des ressources (avec le charbon on peut probablement consommer 2000 Gtep de combustibles fossiles en un siècle, et avec les surgénérateurs on peut aussi faire fonctionner 12.000 réacteurs sans problèmes de ressources) que de ce que seront les premiers effets d'un changement climatique de grande ampleur sur l'humanité. Si cela [désorganise suffisamment la vie de notre espèce](#), notre activité manufacturière d'effondrera, donc la consommation d'énergie et les émissions avec.

Source : Emissions Scenarios, [GIEC](#), 2000

- Si nous poursuivons notre exploration, la famille A2 correspond aux hypothèses suivantes :
- ▶ le monde évolue de manière très hétérogène,
- ▶ la population mondiale atteint 15 milliards d'individus en 2100, sans cesser de croître,



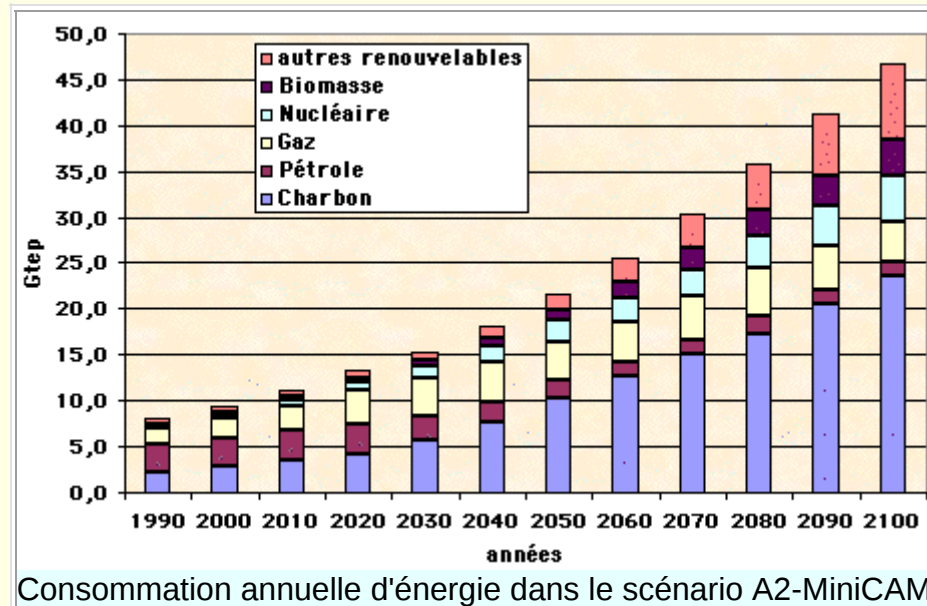
► la croissance économique et la pénétration de nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont très variables selon les régions.

Un exemple de scénario de la famille A2 : A2-MiniCAM

Voici quelques chiffres qui caractérisent ce scénario :

- la consommation d'énergie par habitant et par an monte jusqu'à 3,1 tonnes équivalent pétrole en 2100 (moyenne mondiale), ce qui représente 2 fois la valeur de 2000, ou encore ce que consomme un Italien aujourd'hui.
- la consommation de ressources fossiles par an monte jusqu'à 30 milliards de tonnes équivalent pétrole (en abrégé Gtep) en 2100, soit 4 fois plus qu'aujourd'hui,

essentiellement avec du charbon, pendant que la consommation globale dépasse 45 Gtep, soit 5 fois la consommation actuelle de l'humanité aujourd'hui (graphique ci-dessous)



➤ ce scénario conduit à une consommation cumulée en un siècle de 1.117 Gtep de charbon, soit 150% des réserves prouvées, 262 Gtep de pétrole (moins que les ressources ultimes estimées aujourd'hui) ainsi que 438 Gtep de gaz (plus que les ressources ultimes).

➤ Ce scénario fait aussi largement appel aux sources non carbonnées : il suppose l'existence d'un parc de 6.000 réacteurs nucléaires de 1400 MWe en 2100, et l'exploitation à des fins énergétiques de 30% de la surface de forêts (supposée la même qu'en 2000), avec une hypothèse de rendement net moyen de 3 tep par

hectare de forêt exploitée.

Avec ce scénario, la concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 avoisine 900 ppm, soit 2,5 fois celle d'aujourd'hui en chiffres ronds.

Source : Emissions Scenarios, [GIEC](#), 2000

➤ La famille B1 correspond à un monde où :

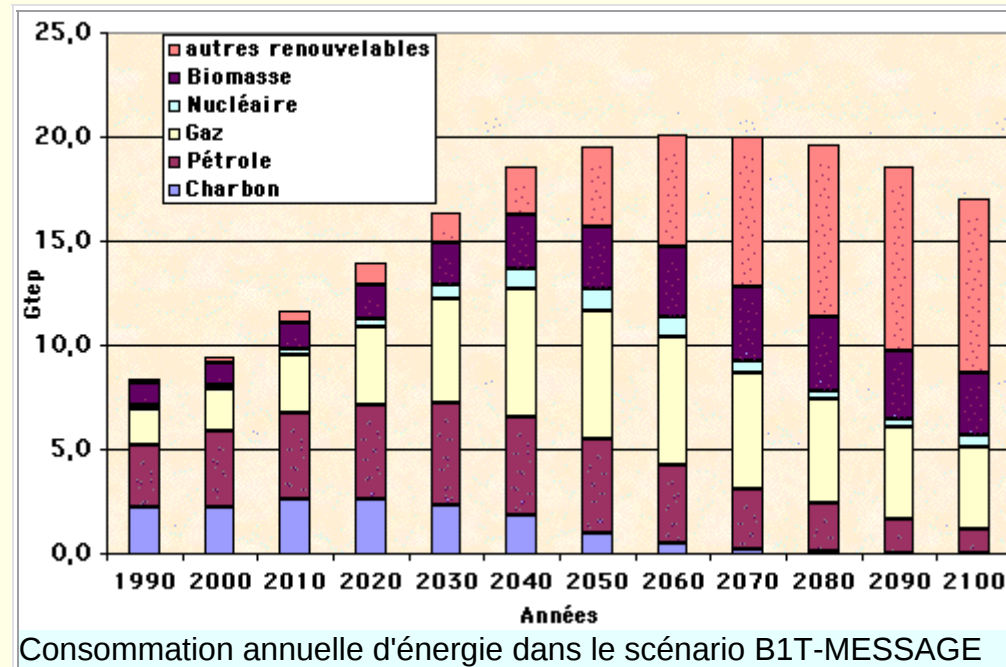
- ▶ la population mondiale culmine en 2050 à près de 9 milliards d'individus puis décroît après (l'évolution démographique est la même que pour les scénarii A1).
- ▶ l'économie est dominée par les services et les technologies de l'information,
- ▶ les nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont massivement utilisées,
- ▶ les problèmes économiques, sociaux et environnementaux constituent un point important des politiques publiques, mais il n'y a pas d'initiative supplémentaire par rapport à aujourd'hui en matière climatique,

Un exemple de scénario de la famille B1 : B1T-MESSAGE

Voici quelques chiffres qui caractérisent ce scénario :

- la consommation d'énergie par habitant et par an monte jusqu'à 2,4 tonnes équivalent pétrole en 2100 (moyenne mondiale), ce qui représente un peu plus de 50% de plus qu'en 2000, ou encore ce que consomme un Portugais aujourd'hui.
- la consommation de ressources fossiles par an monte jusqu'à 12 milliards de tonnes équivalent pétrole (en abrégé Gtep) en 2050, soit 30% fois plus

qu'aujourd'hui, avant de décroître bien en-dessous du niveau d'aujourd'hui (30% de moins).



➤ ce scénario conduit à une consommation cumulée de 155 Gtep de charbon (20% des réserves prouvées), 400 Gtep de pétrole, et 490 Gtep de gaz. Ces deux derniers chiffres sont au-dessus des estimations des [réserves ultimes](#) d'aujourd'hui, mais la consommation cumulée de charbon est très en dessous des simples réserves prouvées.

➤ Ce scénario implique également 600 réacteurs nucléaires à 1400 MWe chacun en 2100, et l'exploitation à des fins énergétiques de 25% de la surface de forêts (supposée la même qu'en 2000), avec une hypothèse de rendement net moyen de

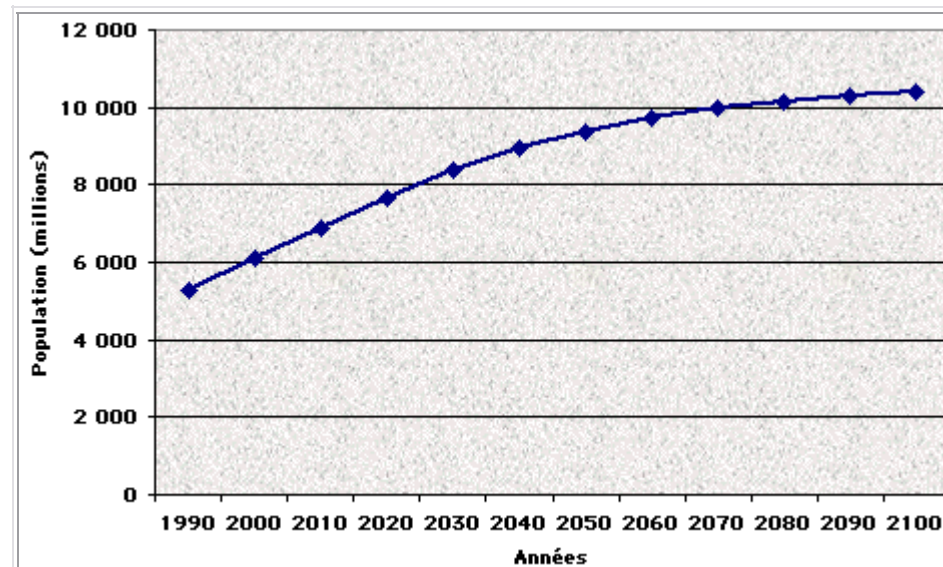
3 tep par hectare de forêt exploitée.

Avec ce scénario, la concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 avoisine 450 ppm, soit 20% de plus que celle d'aujourd'hui en chiffres ronds.

Source : Emissions Scenarios, [GIEC](#), 2000

➤ Enfin la famille B2 correspond à un monde où :

➤ la population mondiale atteint plus de 10 milliards d'individus en 2100, sans cesser de croître,



Evolution de la population mondiale dans la famille B2.

Source : Emissions Scenarios, [GIEC](#), 2000

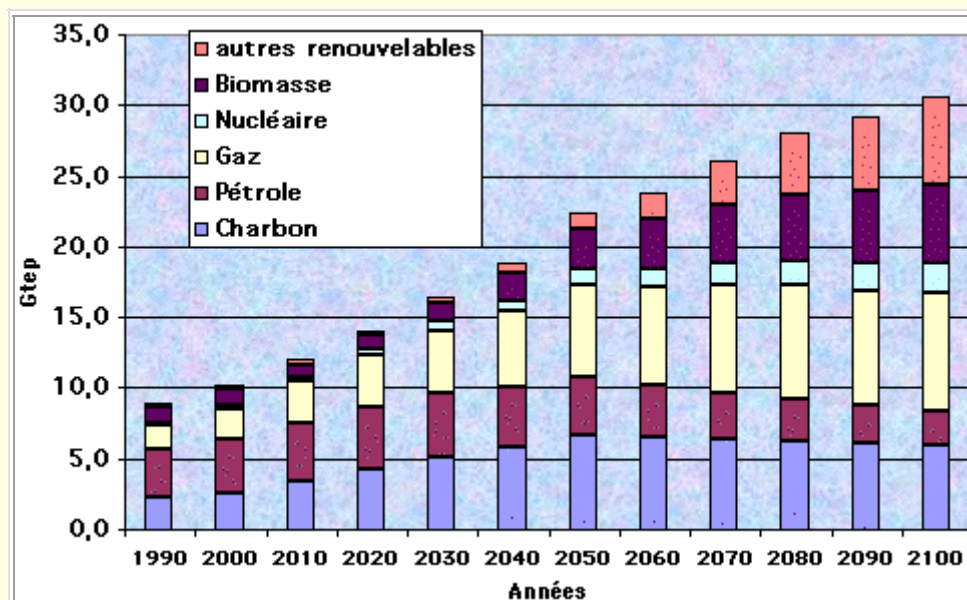
➤ l'économie devient de plus en plus locale, avec les problèmes économiques, sociaux et environnementaux constituant un point important des politiques publiques, mais il n'y a pas d'initiative supplémentaire par rapport à aujourd'hui en matière climatique,

- ▶ la dispersion entre les revenus par tête est inférieure à celle de A2, mais supérieure à celle de A1,
- ▶ les nouvelles technologies énergétiquement efficaces se développent de manière inégale et moins rapidement que dans B1 ou A1.

Un exemple de scénario de la famille B2 : B2-AIM

▶ la consommation d'énergie par habitant et par an monte jusqu'à 2,9 tonnes équivalent pétrole en 2100 (moyenne mondiale), ce qui représente à peu près le double de 2000 (et un peu moins que la consommation d'un Italien d'aujourd'hui).

▶ la consommation de ressources fossiles par an monte jusqu'à 18 milliards de tonnes équivalent pétrole (en abrégé Gtep) en 2050, soit 2,5 fois celle d'aujourd'hui, puis y reste, avec une contribution majeure du gaz. La consommation globale d'énergie monte à 30 Gtep (un peu plus de 3 fois plus qu'aujourd'hui).



Consommation annuelle d'énergie dans le scénario B2-AIM

➤ ce scénario conduit à une consommation cumulée de 570 Gtep de charbon (la quasi-totalité des réserves prouvées, mais 20% des ressources ultimes), 410 Gtep de pétrole, et 620 Gtep de gaz. Ces deux derniers chiffres sont au-dessus des estimations des [réserves ultimes](#) d'aujourd'hui (surtout pour le gaz), mais la consommation cumulée de combustibles fossiles reste en-dessous des seules réserves ultimes de charbon.

➤ Il faut ici environ 2.000 réacteurs nucléaires de 1400 MWe chaque en 2100, et l'exploitation à des fins énergétiques de 45% de la surface de forêts (supposée la même qu'en 2000), avec une hypothèse de rendement net moyen de 3 tep par hectare de forêt exploitée.

Avec ce scénario, la concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 avoisine 740 ppm, soit 2 fois celle d'aujourd'hui en chiffres ronds.

Source : Emissions Scenarios, [GIEC](#), 2000

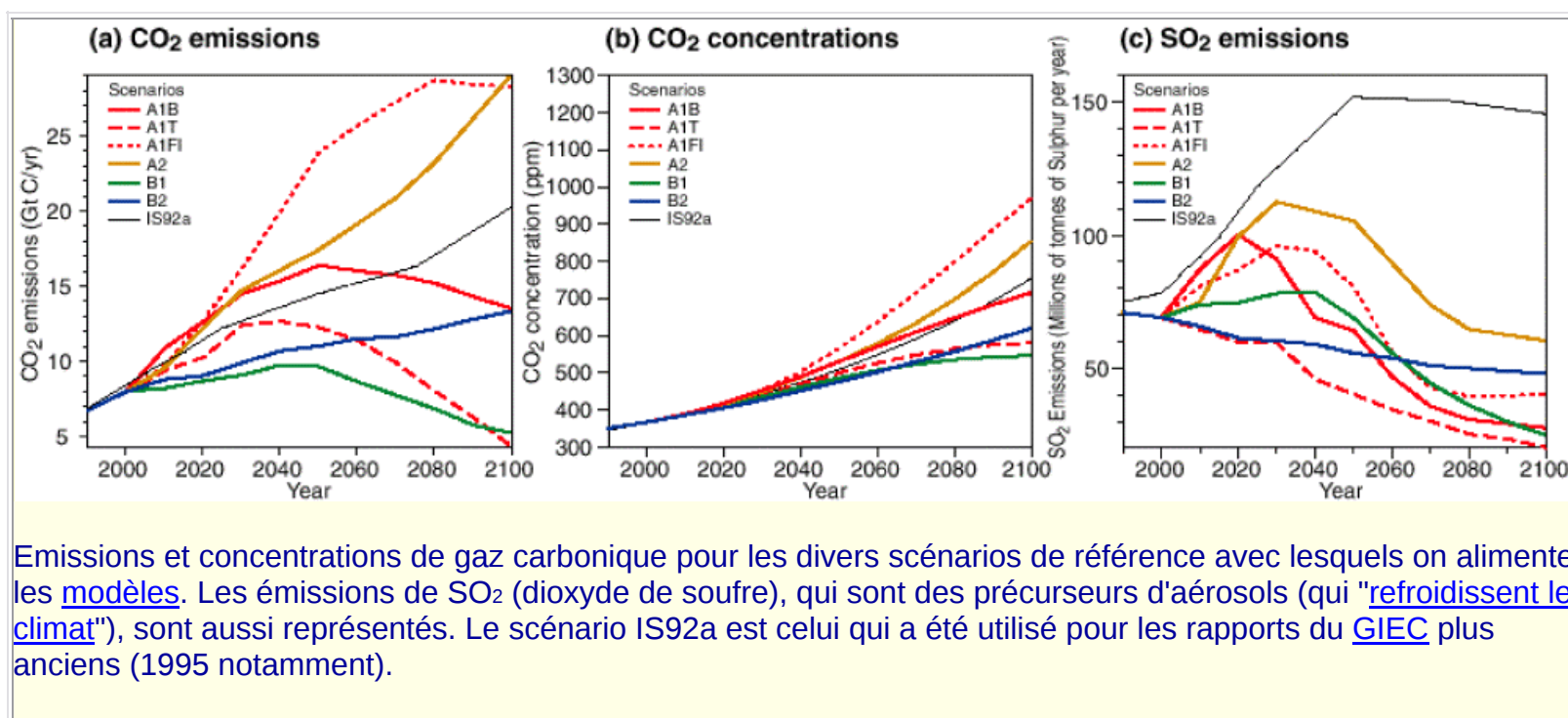
Une petite synthèse ?

Une première conclusion est qu'**aucun de ces scénarios ne correspond à une planète où la lutte contre le changement climatique devient l'une des pierres angulaires de toute politique publique à travers le monde**, et notamment dans les pays développés, et plus particulièrement encore aux USA. Il est aussi essentiel de noter qu'aucun d'entre eux n'inclut de rupture brutale (conflit nucléaire généralisé, épidémie massive, etc), par nature imprévisible. Il s'agit donc d'exercices de prolongation tendancielle où les extrapolations ont été faites avec des facteurs plus ou moins importants.

D'aucuns critiqueront cette manière de procéder, mais comme le futur est par nature hypothétique, il n'y a pas vraiment de mode opératoire de rechange ! Le point essentiel, ici, est plus de savoir exactement de qu'il y a "dans la boîte", que de se livrer à une longue discussion pour savoir si la boîte fait vraiment partie des objets les plus probables que nous devrions trouver sur notre chemin.

Une deuxième conclusion est que beaucoup d'entre eux comportent des consommations cumulées de ressources fossiles pour le 21^è siècle qui sont nettement supérieures aux réserves prouvées d'aujourd'hui, mais, par contre, rares sont les scénarii dont les consommations fossiles totales soient supérieures aux réserves ultimes de combustibles fossiles. Comme il ne peut être totalement exclu que l'on puisse exploiter les hydrates de méthane à l'avenir, ou recourir à la gazéification possible des veines profondes de charbon, il est donc difficile, aujourd'hui, d'en exclure beaucoup pour cette raison de "non-compatibilité" avec les [données connues sur les réserves](#).

Malgré leur nombre limité, ces scénarios aboutissent cependant à des évolutions déjà très différentes des émissions de gaz à effet de serre, comme on peut le constater sur le graphique ci-dessous.



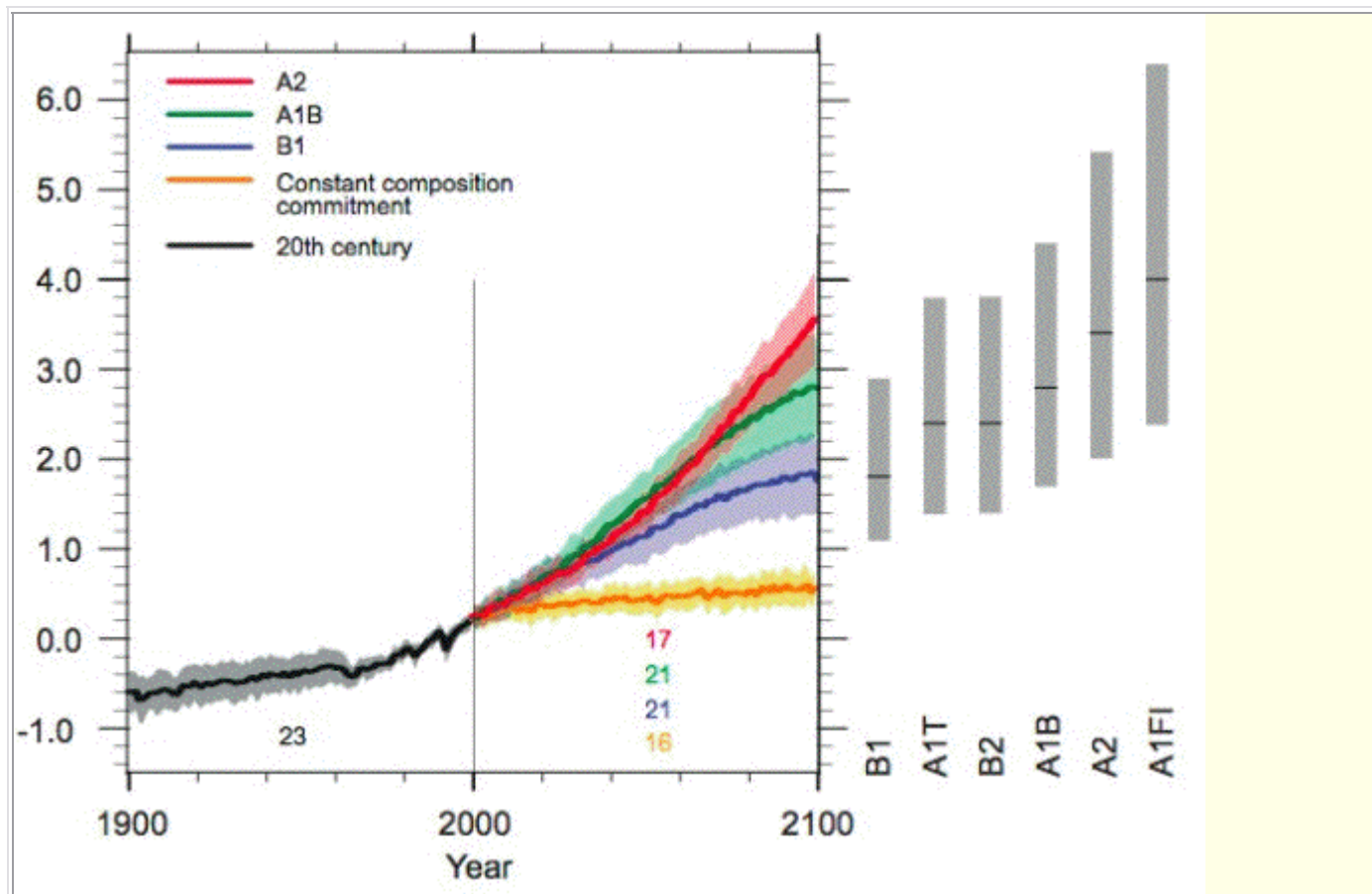
Entre le plus "optimiste" et le plus "pessimiste" des scénarios, on note un écart :

- d'un facteur 5 pour les émissions de CO₂, ce qui reflète les hypothèses très variables sur la croissance démographique, la consommation matérielle (qui gouverne la consommation énergétique, à l'efficacité énergétique près), et les quantités disponibles de combustibles fossiles, qui gouvernent le "mix" énergétique (c'est à dire la proportion de chaque source dans le total),
- d'un facteur 2 entre les extrêmes pour les émissions de méthane, et d'un facteur 1,5 pour les émissions de N₂O, le moindre écart entre les extrêmes que pour le CO₂ reflétant le fait que les émissions de ces gaz "mineurs" sont pour une large part liés à la production agricole, qui est considérée comme étant moins variable que la production industrielle à population donnée.
- d'un facteur 3 pour les émissions de SO₂ (de 20 à 60 millions de tonnes de soufre par an), qui sont des marqueurs de la pollution industrielle locale, et constituent des "refroidisseurs" du climat. Notons que l'intégralité des scénarios "récents" tablent sur des émissions de SO₂ en nette baisse par rapport au scénario IS92a, plus ancien. Cette révision à la baisse est assise sur l'hypothèse que la pollution locale est combattue partout avec énergie (sans mauvais jeu de mots), et que le SO₂, qui est un polluant local "classique", ne sera pas émis autant que ce que l'on pensait il y a quelques années.

Comme une partie du CO₂ a déjà été mis dans l'air avant 2000, la concentration en CO₂ en 2100 ne varie pas, elle, d'un facteur 5, mais d'un facteur 2 seulement.

Source : Emission Scenarios, [GIEC](#), 2000

Et si nous revenons au propos du début de la page, nous pouvons voir ce que cela change à l'élévation de température en 2100 si nous changeons de scénario d'émission. En effet, **pour un même scénario d'émission**, l'écart entre les extrêmes de température moyenne prédite en 2100 selon les divers modèles n'est plus de 4,5 °C mais de 1 à 2 °C, comme on peut le constater sur le graphique ci-dessous.



Prédictions de l'augmentation de la température moyenne de surface entre 1990 et 2100 selon les scénarios et les modèles.

Pour un scénario donné (désigné par un sigle et matérialisé par une couleur), la dispersion des élévations de température prédites selon les modèles est matérialisée par la barre à droite de la couleur du scénario.

Par exemple le scénario A1B, en vert gras, engendre une élévation de température de 1,6 à 4,4°C selon les modèles (2 °C d'écart entre les extrêmes).

Le scénario B2, en vert, conduit à 1,2 à 3,8 °C en plus selon les modèles, c'est à dire que pour ce scénario là, "l'imprécision" des modèles engendre 2 °C d'écart sur la température atteinte, etc.

Source : [GIEC](#), 2007

Le corollaire de ce constat est bien entendu que nous sommes encore partiellement maîtres de notre destin. Tout raisonnement qui consisterait à penser "foutu pour foutu, continuons comme maintenant" est donc invalide : il est bien entendu encore en notre pouvoir de "faire quelque chose" pour le long terme, même si aucun effort ne sera visible instantanément. Nous sommes dans le même paradigme que le gros fumeur : le lendemain du jour où il réduit sa consommation, tout risque n'est pas écarté pour autant, de même que de réduire un jour puis repartir comme avant le lendemain ne sert pas à grand chose. Ce n'est que l'effort soutenu qui infléchit les tendances à long terme et qui produira des résultats.

Cesser rapidement d'émettre des gaz à effet de serre suffirait-il à arrêter le réchauffement en cours ?

dernière version : janvier 2008

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

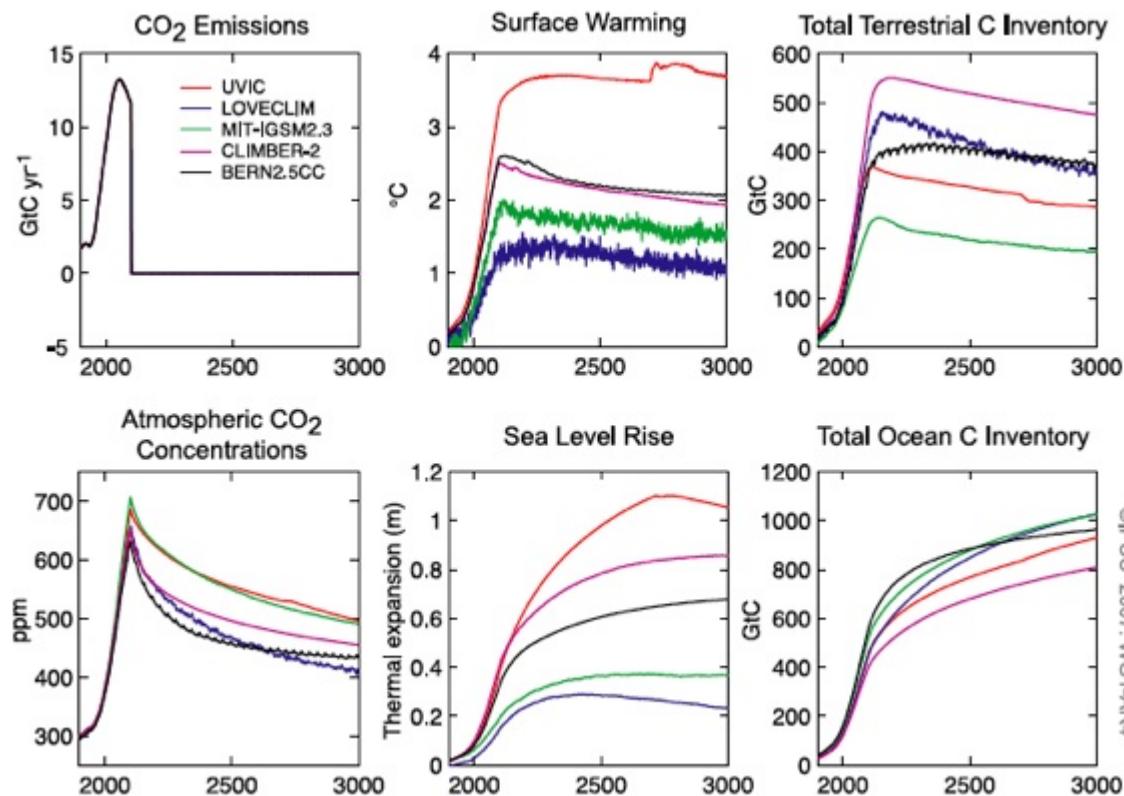
Pour bon nombre de problèmes d'environnements, nous avons tendance à tenir compte de ce qui est une réalité : dès que nous arrêtons la nuisance, le problème se stabilise, puis nous avons accès à une certaine forme de remise en état. Par exemple :

- si nous avons des voitures qui font trop de bruit, le problème s'arrête dès que la circulation s'arrête,
- si nous avons trop d'oxydes d'azote dans l'air, le problème s'arrête d'augmenter dès que la circulation s'arrête, et très rapidement la qualité de l'air s'améliore,

- si une carrière défigure le paysage, on peut l'arrêter, tout reboucher, replanter des arbres, et c'est "presque comme si" il n'y avait jamais eu de carrière,
- si une usine pollue trop une rivière, on arrête l'usine (ou on met ce qu'il faut comme épuration de l'eau), et pas trop longtemps après l'eau de la rivière redevient presque aussi propre "qu'avant",
- et plus généralement tant qu'une situation n'est pas trop dégradée on peut "remettre les choses en état" : reconstituer un stock de poissons en arrêtant la pêche, préserver une espèce et lui permettre de repartir, etc.

De ce fait, la grande majorité d'entre nous a intuitivement tendance à considérer que pour le changement climatique, c'est pareil : que personne ne s'affole ; le jour où nous trouverons que la plaisanterie a assez duré nous ferons ce qu'il faut pour passer l'éponge et faire "comme si" il n'y avait jamais eu de changement climatique. Pas de chance : c'est impossible. Ici, **la notion même de remise en état du système n'existe pas**, du moins pas aux échelles de temps qui nous intéressent. En effet, la durée de vie ("le temps qu'il y restent") des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est très long, notamment pour le principal d'entre eux, le gaz carbonique, qui a une durée de vie dans l'atmosphère de l'ordre du siècle (cela signifie, en simplifiant un peu, qu'il faut attendre de l'ordre du siècle pour que la dernière tonne de CO₂ arrivée dans l'atmosphère commence à s'évacuer).

En pratique, si nous arrêtons totalement les émissions demain matin (y compris la respiration !), cela aurait pour seul effet de faire lentement décroître la concentration atmosphérique en CO₂. Mais, à supposer que nous n'ayons pas déjà fait ce qu'il faut pour complètement "dérégler" le cycle du carbone, c'est ensuite quelques milliers d'années au moins qu'il faut attendre pour que la concentration du CO₂ dans l'atmosphère revienne à son niveau de 1850.



Evolution d'un certain nombre de paramètres du système climatique avec des émissions de CO₂ qui croissent jusqu'à 14 milliards de tonnes de carbone au cours du 21^e siècle puis deviennent subitement nulles en 2100 (chaque couleur de courbe correspond à un [modèle](#) différent). Il est facile de constater que :

- la concentration atmosphérique en CO₂ de l'an 3000 est toujours bien supérieure à ce qu'elle est en 2000 (en bas à gauche),
- le réchauffement acquis en 2100 est toujours là pour l'essentiel 1000 ans plus tard (en haut au milieu), et ce genre de simulation ne tient pas compte d'éventuels franchissements de seuils sur le cycle du carbone ou les calottes polaires, très difficiles à

prendre en compte dans les simulations.

Source : [GIEC](#), 2007

Comme les gaz à effet de serre continuent à jouer le rôle de couverture (ou de vitre de serre) tant qu'ils sont présents, leur très grande longévité a pour conséquence que, **quoi que nous fassions aujourd'hui, le réchauffement issu des gaz que l'homme a mis dans l'atmosphère depuis 1750 se poursuivra pour encore quelques siècles.**

D'autres compartiments du système climatique vont également prendre du temps pour "répondre" au [renforcement de l'effet de serre](#), notamment l'océan et les calottes glaciaires des pôles (graphique ci-dessous).

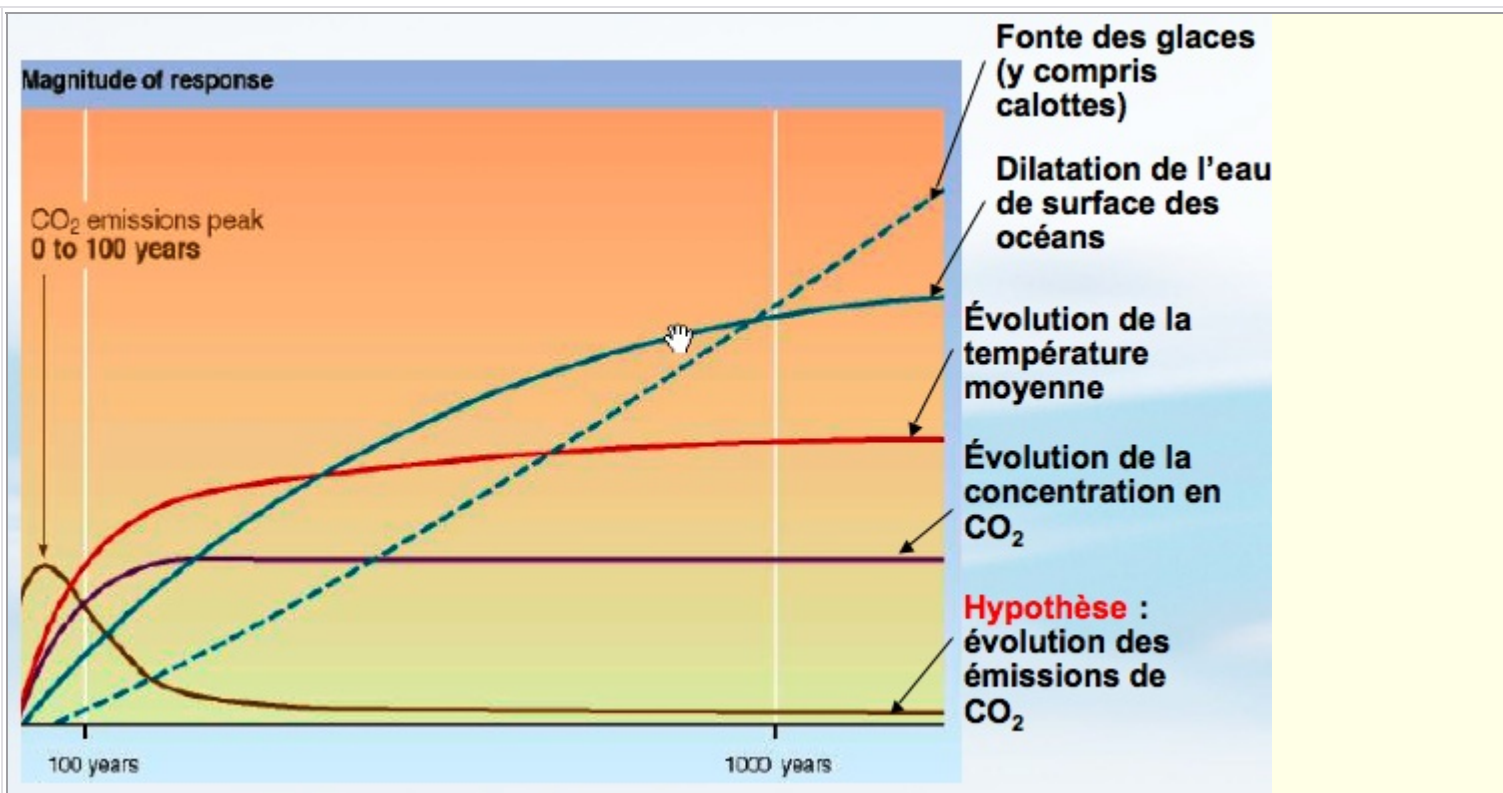


Illustration de la réponse des principaux compartiments du système climatique (enfin ceux qui jouent un rôle important à l'échelle du siècle ou du millénaire) avec un profil d'émissions qui passe par un maximum au cours du 21^è siècle - hypothèse raisonnable au vu des contraintes sur les combustibles fossiles - puis décroît derrière (courbe marron, tout en bas, culminant en 2050 environ sur cet exemple).

Il est facile de voir que dans cette situation la montée des températures perdure pendant plusieurs siècles après la décroissance des émissions, et le niveau de la mer monte pendant plusieurs millénaires.

L'ampleur de la réponse des diverses composantes du système climatique dépend bien sûr du niveau

auquel le CO₂ se stabilise et donc de la date et du niveau du maximum des émissions.

Source : [GIEC](#), 2001

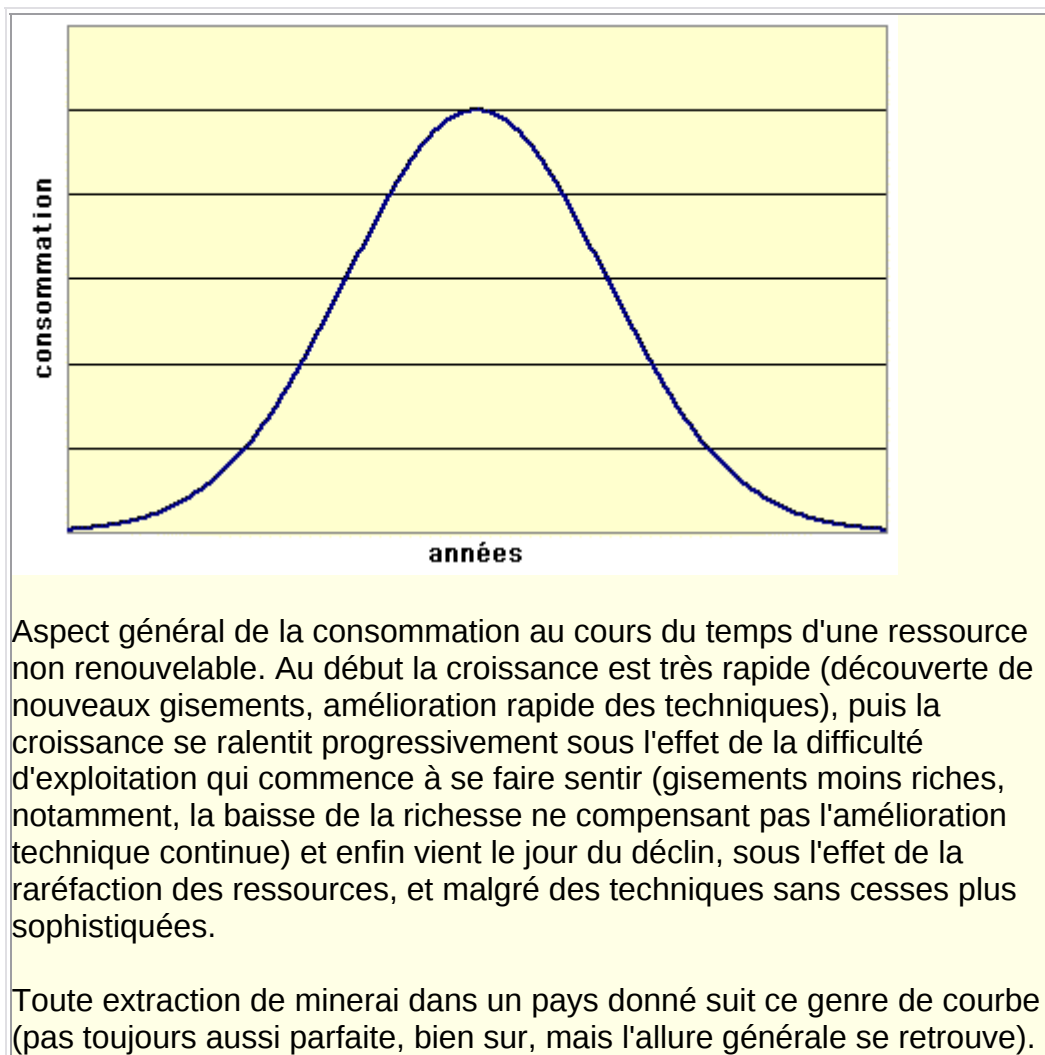
A cause de la très grande inertie de certaines des composantes de la machine climatique, l'évolution que nous avons mise en route aura donc des conséquences pendant quelques milliers d'années, quoi que nous fassions désormais. Osons un parallèle : la machine climatique se comporte un peu comme une voiture dont le premier comportement, quand on appuie sur la pédale de frein, est d'accélérer un peu plus fort. Il est assez facile de comprendre que si nous attendons pour agir que la situation soit déjà dégradée, alors la seule garantie que nous aurons à ce moment-là sera que "ça sera pire derrière", quoi que nous fassions.

Certes, en 2008 il est encore entre nos mains d'avoir [une évolution forte ou faible](#), un [changement d'ère climatique](#) ou peut-être une simple modification gérable de l'ère actuelle, car le moment où l'on commence à diminuer nos émissions et la vitesse de diminution ont un impact très fort sur les [températures maximum atteintes](#) et la pente de montée en température (la vitesse avec laquelle les températures augmentent). Mais cette option ne va pas rester ouverte très longtemps...

Rappelons que, pour l'essentiel des gaz à effet de serre d'origine humaine, il n'existe aucun procédé connu ou envisageable qui permette de retirer rapidement le surplus de gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère. Pour le CO₂, en particulier, il est possible en théorie d'accélérer le fonctionnement des [puits de carbone](#) naturels (sols, arbres, océan), mais cette accélération ne pourrait en aucun cas épurer en quelques années l'excès de CO₂ mis dans l'air depuis 1750. Cela pourrait éventuellement permettre d'épurer quelques dizaines de ppm en quelques décennies, et ce à supposer que nous n'émettions plus rien et que par ailleurs les écosystèmes terrestres continuent à se porter à peu près bien, ce qui cessera d'être le cas d'ici quelques décennies si nous faisons trop les andouilles. En outre, pour la partie océanique, une accélération de cette épuration [augmente l'acidification de l'eau](#), on n'a rien sans rien....

Mais il y a une autre conclusion que nous pouvons tirer du graphique ci-dessus : admettons que la baisse des émissions de CO₂ soit non point le reflet de notre sagesse, c'est à dire la conséquence d'une limitation volontaire de notre consommation, mais le simple reflet d'une raréfaction des [combustibles fossiles](#), parce que nous n'aurons pas su nous arrêter avant.

En effet, la courbe des émissions (en marron) dans le graphique ci-dessus ressemble assez à ce qu'elle serait si nous arrêtons progressivement de consommer des combustibles fossiles sous le seul effet de la pénurie (courbe ci-dessous).



C'est par exemple le cas pour l'extraction pétrolière aux Etats-Unis (qui a cru jusqu'à un maximum il y a 30 ans, et est depuis en phase de déclin).

Si cette courbe concerne la consommation de combustibles fossiles de la planète dans son ensemble, les émissions de CO₂ auront exactement la même allure, bien sûr.

Que se passe-t-il alors ? Le graphique du haut de la page peut se traduire comme suit, dans ce cas précis :

➤ d'abord nous subissons les effets de la pénurie, c'est à dire de la diminution progressive de l'approvisionnement en combustibles fossiles, alors que nous ne nous étions pas préparés à cela (sinon ce n'est plus une pénurie !), ce qui a toutes les chances de provoquer quelques soubressauts désagréables,

➤ malgré cette baisse des émissions consécutives à la pénurie, la concentration en CO₂ continue d'augmenter pendant encore un siècle (ordre de grandeur),

➤ et surtout la température, au moment où nous passons le pic des émissions de CO₂, continue d'augmenter **rapidement** pendant plus d'un siècle. En d'autres termes la perturbation continue à aller croissant, alors que nos moyens de réponse, en première approximation conditionnés par la quantité d'énergie disponible, pourraient aller en décroissant rapidement, à cause de la pénurie en combustibles fossiles (l'inconnue est l'[énergie non fossile](#), bien sûr).

En clair, si nous attendons la [pénurie de combustibles fossiles](#) pour limiter nos émissions, nous avons alors de bonnes chances de nous retrouver dans une situation où nous cumulerons des ennuis sans cesse croissants (parce que le système sera de plus en plus perturbé) avec de moins en moins de moyens d'y faire face. Voilà une situation que nous serions peut-être bien inspirés de chercher à éviter...

Existe-t-il un seuil de danger bien identifié dans le cadre du réchauffement climatique ?

dernière version : novembre 2006

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Les seuils dans le changement climatique

Un processus est dit "à effet de seuil" quand il existe un certain niveau de perturbation - qualifié de seuil - en dessous duquel la conséquence est proportionnelle à la perturbation, et au-delà duquel les choses se mettent à évoluer de manière totalement différente. Un bon exemple de phénomène à effet de seuil est l'élastique : tirons le un peu, il s'allonge. Tirons le un peu plus, il s'allongera un peu plus. A chaque effort de traction supplémentaire, il s'allongera encore, jusqu'au moment où....il cassera. Nous aurons alors franchi un seuil : une petite perturbation supplémentaire aura engendré un changement d'ampleur et de nature de la conséquence (cassure au lieu de l'allongement), et en outre, dans l'exemple choisi, la conséquence ne sera pas réversible (nous ne pouvons pas ressouder l'élastique).

Notre climat est rempli de tels processus à effet de seuil, et nous ne connaissons pas précisément - voire pas du tout, parfois - les niveaux de perturbation auxquels telle ou telle des composantes peut "casser", c'est à dire se mettre à se comporter de manière très différente de ce qui s'est passé jusqu'à maintenant. Nous commençons par exemple à savoir que de tels seuils existent pour les [courants océaniques](#), pour la température maximale que [supportent les coraux](#), pour [l'acidité maximale](#) supportable par les organismes marins, ou encore l'élévation de température maximale que le Groenland peut supporter sans fondre. Mais pour l'essentiel des processus climatiques les seuils ne sont pas nécessairement connus, et quand ils le sont qualitativement ils sont loin de l'être toujours quantitativement.

En outre certaines élévations de température peuvent être sans grande conséquence à l'horizon d'un siècle, mais avoir des répercussions majeures à plus long terme, parce que [la température ne s'arrête pas de monter au bout d'un siècle](#). Pour savoir si, pour telle ou telle composante du climat, nous avons franchi un seuil ou pas, il faut aussi savoir à quel horizon de temps nous allons au résultat.

En conséquence de ce qui précède, **il n'est pas possible, aujourd'hui, de dire qu'il existe une élévation de température en dessous de laquelle nous sommes garantis à tout jamais contre tout ennui majeur, mais au-delà de laquelle nous nous**

mettons à courir tout d'un coup des risques considérables. Aucun scientifique ne peut dire qu'il est raisonnable de ne pas dépasser une hausse de 1,63 °C sur 98 ans, qu'en dessous de ce seuil nous sommes garantis contre toute catastrophe et qu'au-dessus l'Apocalypse est pour demain, ou encore qu'un plafond de 435 ppmv de [gaz carbonique](#) dans l'atmosphère peut être atteint sans risque, mais pas de 436 ppmv.

Les seuils dans la capacité de résistance

Ensuite, ce que l'on appelle un risque ne résulte pas seulement de la modification des conditions environnantes, mais dépend aussi de notre aptitude - ou pas - à faire face à ladite modification. Une pierre qui chute sur notre tête ne présente pas le même risque selon que nous portons un casque ou pas. Et pour en revenir au climat, une diminution limitée du rendement de l'agriculture - causée par un changement climatique - n'est pas un "risque" majeur pour la France, qui produit bien plus que sa propre consommation, mais méritera éventuellement d'être qualifié comme tel en Inde ou en Chine si elle y survenait aujourd'hui.

Plus généralement, si nous tentons de qualifier les risques liés à d'éventuelles modifications climatiques pouvant survenir dans 50 ou 200 ans, il nous faut non seulement pouvoir décrire les modifications climatiques en question (parlons nous du [niveau de la mer](#) ? Des [courants marins](#) ? des [maladies](#) ?) mais aussi connaître les moyens qui seront à la disposition de la société à ce moment là (que restera-t-il de la présente abondance énergétique ? Y aura-t-il encore des forêts ou d'autres ressources naturelles qui seraient alors utiles pour s'adapter ? etc), et cette prospective n'est pas nécessairement plus facile que la prospective climatique !

En particulier, ce qui gouverne notre aptitude à changer le monde, aujourd'hui comme demain, et donc notre aptitude à faire face à une évolution donnée, est l'énergie abondante. C'est elle qui nous permet de construire des infrastructures de transport et de faire rouler des camions pour importer de la nourriture des zones propices à l'agriculture, c'est elle qui nous permet de résister au froid ou au chaud, c'est elle qui nous permet de produire médicaments, vaccins, outils, qui nous rend mobiles..... Et toutes ces choses concourent à une capacité de résistance forte à l'alea.

Or que l'énergie soit encore abondante dans 50 ans est un vaste sujet de débat ! Pour l'énergie fossile, par exemple, [la prolongation des tendances sur 50 ans nous conduit à consommer tout ce que nous avons comme réserves aujourd'hui connues](#) (charbon compris), sans parler du [problème climatique](#) associé au large dans l'atmosphère du CO₂ correspondant.

Revenons à l'exemple de l'agriculture, indispensable à la survie de quelques milliards d'hommes. Si plus rien ne pousse sur place, la gravité de la situation n'est pas la même selon qu'il reste ou non de l'énergie abondante pour transporter massivement de quoi manger en provenance d'un autre endroit propice à l'agriculture.

De même, la capacité de résistance aux [nouvelles maladies](#) ne sera pas la même dans un pays doté d'infrastructures sanitaires et prophylactiques avancées que dans un pays qui n'en est pas doté, etc.

Enfin la catastrophe est une notion à géométrie variable : le seuil n'est pas mis au même endroit par tout le monde !

Un "franchissement de seuil" s'appelle souvent, dans le langage courant, une catastrophe. Ainsi, un glissement de terrain faisant des morts (franchissement d'un seuil dans la capacité de cohésion du terrain) est une catastrophe, une épidémie (franchissement d'un seuil dans l'exposition aux agents pathogènes) est une catastrophe, une tempête (franchissement d'un seuil dans la vitesse du vent) est une catastrophe, etc.

A supposer que nous soyons capable de discerner toutes les conséquences possibles d'un changement climatique donné (ce qui n'est pas le cas), pour savoir si nous avons ou pas dépassé le seuil de danger il reste à définir ce que nous estimons être une catastrophe. Si nous parvenons à cette définition, nous pouvons considérer que tant que nous n'avons pas de catastrophe, c'est que nous sommes en dessous du seuil de danger, et si nous avons des catastrophes plus tard, nous sommes déjà au-delà. Or la notion de catastrophe n'est pas objective : tout dépend de qui parle.

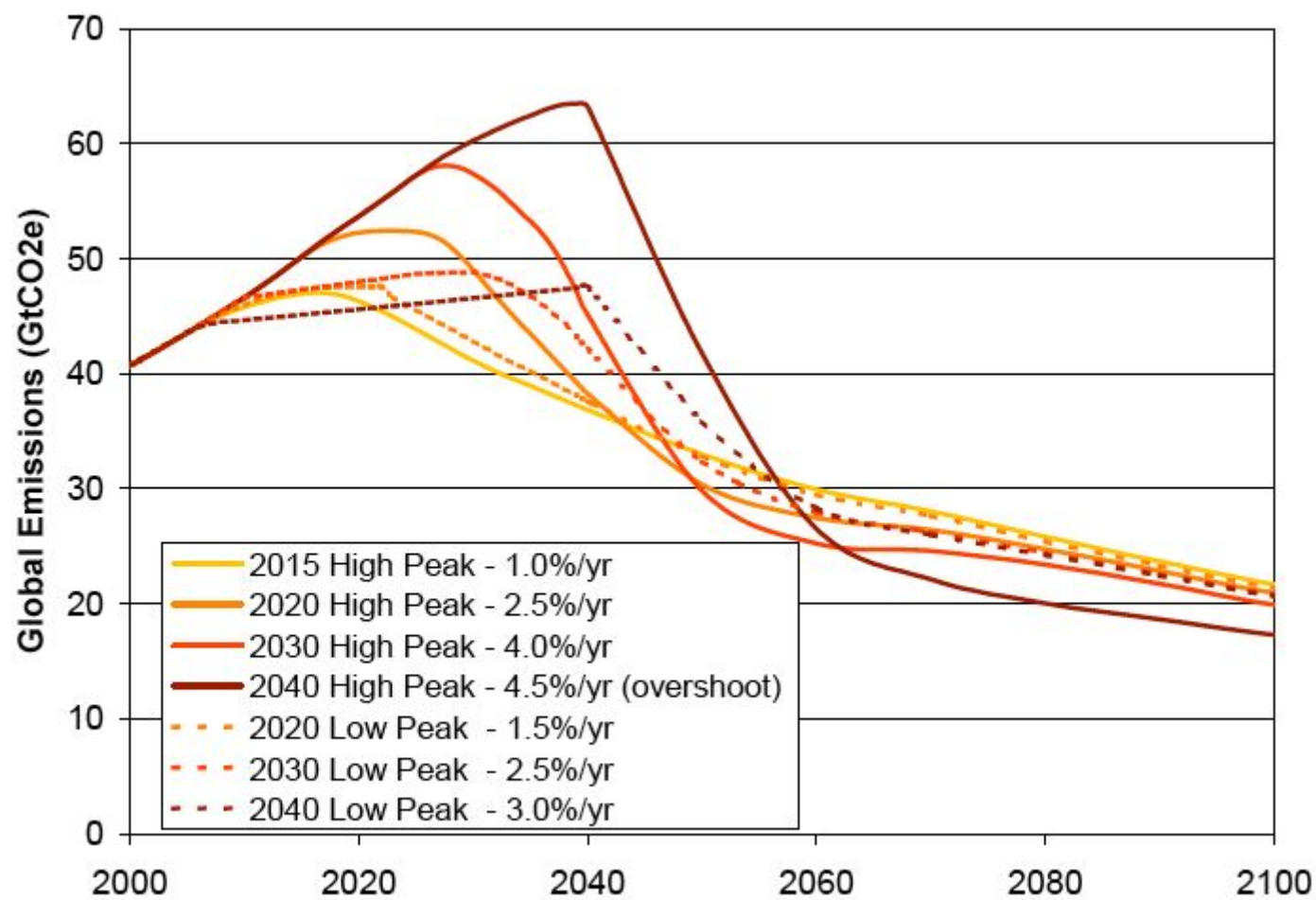
Prenons un cas de figure concret : la possible [disparition des coraux](#) si la température moyenne monte de plus de 2 °C. Est-ce une catastrophe ? La réponse ne sera probablement pas la même selon que l'on demande à un pêcheur Norvégien ou à un agent de voyages spécialisé dans les plongées des mers chaudes, pour ne prendre que deux Occidentaux en exemple.

Admettons que le changement climatique amène 3 ouragans par hiver en France, du même type que celui que nous avons connu en 1999. Est-ce une catastrophe ? Pour moi peut-être, pour un couvreur français sûrement pas, et pour un Chilien assurément pas.

Admettons que le changement climatique fasse mourir de faim 2 milliards d'individus. Est-ce une catastrophe ? Là encore, la réponse variera sûrement selon la localisation des morts, les répercussion possibles "ailleurs", et l'auteur de la réponse....

Et ceux qui comptent, ils disent quoi ?

En novembre 2006, un dénommé Nicholas Stern, ancien économiste en chef de la Banque Mondiale, a rendu un rapport qui a fait grand bruit, dans lequel il chiffre le coût possible du changement climatique à quelques milliers de milliards de dollars par an si nous ne "faisons rien". Il indique par ailleurs que pour lui le "changement catastrophique" démarre à 2°C d'élévation de la température planétaire, et, ce qui est le plus intéressant, montre quelles sont les émissions de gaz à effet de serre qui permettent de rester sous ce niveau.



Trajectoires des émissions mondiales de CO₂-équivalent qui permettent de rester sous la barre des 550 ppm de CO₂ équivalent en 2100, selon le rapport Stern. La trajectoire "overshoot" n'est pas à prendre en compte car aboutissant à une concentration supérieure. 550 ppm est une concentration permettant "d'espérer" que la température planétaire ne monte pas de plus de 2 °C.

Source : [The economics of climate change, Stern Review](#), Cambridge University Press

Il est intéressant de noter que les émissions qui permettent d'éviter un changement climatique "catastrophique" sont exactement celles où la consommation d'énergie fossile de la planète décroît après le passage du [pic de production du pétrole seul](#), vers 2020. En clair, le défi pour éviter un "changement climatique catastrophique", avec une approximation qui vaut ce qu'elle vaut, est de ne pas se reporter du pétrole sur le charbon à partir de 2010/2015 (ce qui est possible pendant quelques dizaines d'années, [mais pas plus](#) !).

En guise de conclusion...

La discussion récurrente sur l'existence des seuils, et surtout sur le moment où nous pourrions les dépasser, nécessite donc d'avoir de la visibilité :

- sur l'évolution future du système climatique pour chaque [scénario d'émission](#) de gaz à effet de serre,
- sur les [impacts](#) d'une évolution climatique donnée,
- sur les moyens de "résistance" qui seront encore à notre disposition, à l'horizon de temps qui nous intéresse, pour faire face à ces impacts,
- sur ce qui est personnellement ou collectivement acceptable et ce qui ne l'est pas dans les conséquences possibles (ce qui peut éventuellement se traduire en modélisations économiques, puisque nombre de prix représentent des consentements à payer).

De ce fait, compte tenu de l'imprécision sur ce que sera notre faculté d'adaptation dans quelques décennies (ou quelques siècles), de l'appréciation nécessairement subjective de ce qu'est une conséquence intolérable, et de l'inertie des processus en cause, **il n'est pas possible de dire à quel moment nous aurons éventuellement "dépassé le seuil de risque tolérable", ni même de dire si nous ne l'avons pas déjà dépassé.**

Va-t-on avoir plus d'ouragans et de phénomènes extrêmes ?

dernière version : février 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Pour de bonnes ou de mauvaises raisons, les "phénomènes extrêmes" focalisent facilement l'attention quand on s'interroge sur les conséquences possibles du changement climatique. La bonne raison, c'est bien évidemment que ce genre de phénomène, quand et où il survient, peut avoir des effets que l'on met des années - voire des décennies - à effacer. Mais la mauvaise raison, d'une certaine manière, est que les effets les plus meurtriers du changement climatique ne seront pas la conséquence de ces phénomènes "extrêmes", mais bien de ce qui deviendra les conditions "ordinaires" du climat, et à la suite l'évolution de la production agricole, des zones endémiques d'épidémie, et de l'instabilité politique. Car un rapide examen de l'histoire nous montre que les plus grandes causes de mortalité sont, et de très loin, les famines, les maladies, et l'instabilité politique (dont les guerres et les régimes totalitaires sont des conséquences), qui ont bien plus tué, et continuent de tuer bien plus, que les ouragans, tsunamis, et autres tornades.

Ceci étant dit, si nous en revenons à la question, il est très difficile d'y répondre avec les seuls outils qui existent pour faire de la prospective dans cette affaire, à savoir les [modèles](#) de climat. En effet, ces derniers ne permettent pas, pour l'instant, de répondre de **manière formelle** sur la question des "phénomènes extrêmes", qui sont, par définition, des phénomènes inhabituels, alors que la modélisation est surtout destinée à donner des évolutions moyennes. Cela ne signifie bien entendu absolument pas que le nombre de phénomènes extrêmes ou leur violence n'augmentera pas ; un certain nombre d'indices laissent même penser que nous aurons une augmentation de notre exposition à ce risque. Mais il ne s'agit que d'indices, pas d'une preuve formelle, car la modélisation touche à ses limites sur ce point.

Pourquoi les modèles de climat global ne sont-ils pas capables d'apporter une certitude ?

➤ la modélisation climatique date de [quelques dizaines d'années déjà](#). A l'époque, les phénomènes extrêmes ne préoccupaient absolument pas le public, ni même [les scientifiques](#), qui cherchaient surtout à comprendre comment fonctionne le climat dans ses grandes lignes. Les modèles n'ont donc pas été conçus pour pouvoir travailler spécifiquement sur la question des phénomènes

extrêmes, et de toute façon il est difficile de raisonner sur ces phénomènes tant que les grands déterminants du climat ne sont pas explicités !

➤pour pouvoir prédire avec un degré de confiance acceptable l'évolution de phénomènes dont la taille est de l'ordre de quelques centaines de km de diamètre ou moins (un ouragan fait de 500 à 1.000 km de diamètre, une tornade moins de 1 km, un orage quelques km...), il faut travailler avec un modèle dont la maille (voir [modèles](#)) est de quelques km de côté, comme c'est le cas en météorologie. Or les [modèles climatiques actuels](#) travaillent avec des mailles de l'ordre de la centaine de km de côté (quelques fois moins sur une zone donnée avec les modèles à maille variable, mais alors c'est que la taille de la maille se met à faire bien plus de la centaine de km "ailleurs"), ce qui est très nettement insuffisant pour analyser avec un bon degré de confiance la fréquence de ce genre de catastrophe.

➤pour les moyennes, il y a eu de nombreux programmes de comparaison des simulations, et c'est à partir de ces comparaisons des résultats de divers modèles que la communauté scientifique s'est accordée sur les conclusions à tirer. Dans le cas des phénomènes extrêmes, il n'y a pas encore eu ce processus de comparaison de modèles alimentés avec des hypothèses identiques, pour savoir ce que chacun d'entre eux "produisait" comme phénomènes extrêmes et voir si il y avait consensus entre les divers modèles.

Mais quelques indices peuvent quand même être obtenus en analysant les résultats disponibles.

La variabilité

La variabilité est la mesure de la fréquence et de l'intensité avec lesquelles une valeur s'écarte de la moyenne.

Comme son nom l'indique, un phénomène extrême est un phénomène "à l'extrême" des valeurs "normales", ces dernières étant près de la moyenne.

Un phénomène extrême correspond donc au cas où un paramètre au moins du climat (les précipitations, le vent, la température...) est très éloignée de sa valeur moyenne. En hiver, une température de 25 °C sera "extrême", parce que la moyenne est beaucoup plus basse. [Météo France](#) parle souvent de températures "très éloignées des normales saisonnières" ou "dans les normales saisonnières": c'est une autre manière de

dire "loin de la moyenne" ou "dans la moyenne", ou encore "extrême" ou "normal".

En regardant si, au fur et à mesure que l'on avance dans le temps, les valeurs instantanées fournies par l'ordinateur (qui concernent la température, la pression, etc, sur tout un ensemble de points, voir [page sur les modèles](#)), se comportent de manière de plus en plus erratique sur la durée de simulation (un siècle, 2 siècles...), et surtout comment elles se comparent à la moyenne calculée en bout de simulation, on peut tenter un début de conclusion sur l'évolution de la variabilité du climat futur.

Si cette variabilité du climat modélisé augmente, cela signifie que le risque existe que le climat réel produise, à l'avenir, de plus en plus de valeurs "inhabituelles", "en dehors des normales", et donc qu'il y aura vraisemblablement plus de phénomènes extrêmes, et/ou de plus grande ampleur.

Pour certains modèles (pas pour tous), on a étudié l'évolution de cette variabilité du climat futur. Les modèles étudiés font tous ressortir une évolution à la hausse de cette variabilité, notamment en ce qui concerne le cycle de l'eau.

Cela signifie donc une possible augmentation :

- des inondations,
- des sécheresses (et peut-être...des gelées intenses sous nos latitudes).

Certains modèles prédisent également une augmentation des tempêtes (ce qui se matérialise par une occurrence plus fréquente de vitesses de vent élevées). C'est un premier résultat, qui demande à être confirmé par un travail approfondi, mais qui indique quand même que **le risque de voir apparaître plus de phénomènes extrêmes existe**, sans que l'on puisse nécessairement localiser les endroits qui seront plus particulièrement concernés ou quantifier cette augmentation.

El Niño et La Niña donnent un exemple intéressant illustrant cette difficulté de localisation et les enchaînements en cascade qui peuvent conduire une simple différence de température à des catastrophes.

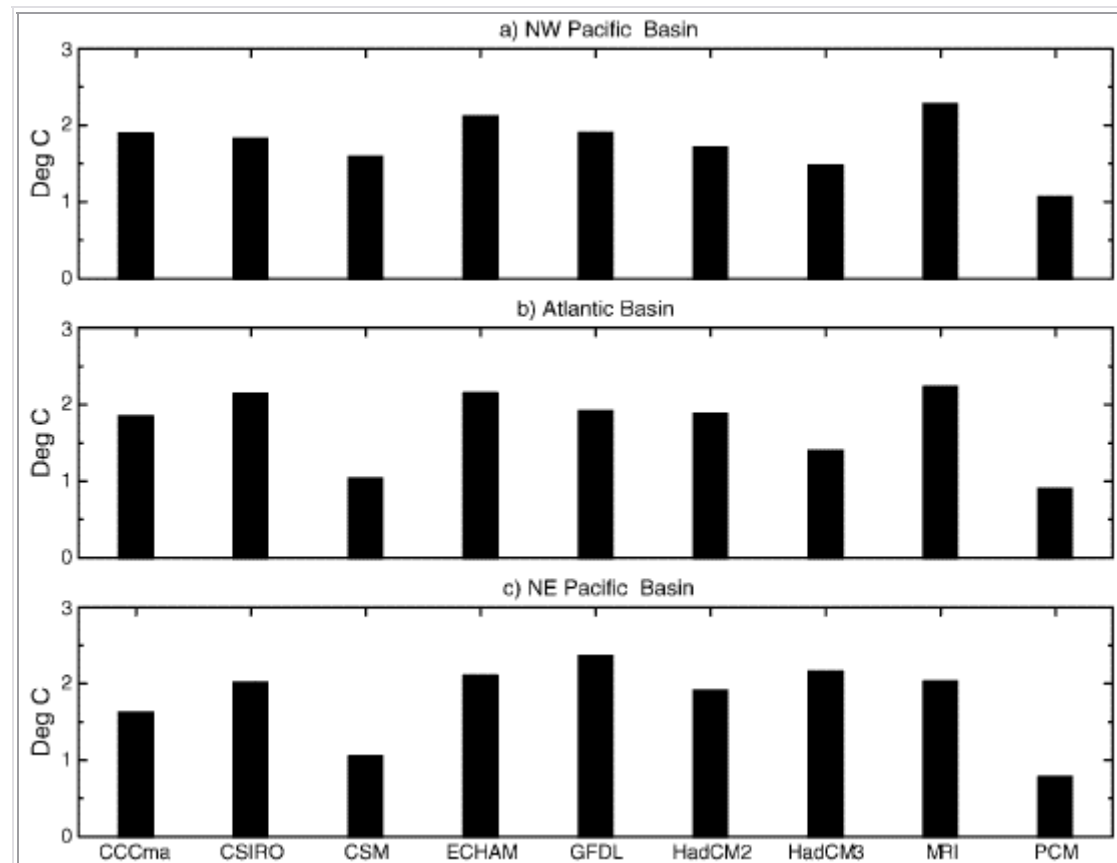
En effet, les effets observés d'El Nino résultent d'une variation de **quelques degrés seulement** (2 ou 3 °C) de la température de surface des eaux du Pacifique Est (en fait c'est une inversion entre les températures du Pacifique Ouest - normalement les plus chaudes - et du Pacifique Est - normalement les plus froides - sous l'effet d'un affaiblissement des Alizés, qui normalement poussent les eaux chaudes à l'Ouest).

Or les conséquences :

- se produisent pour partie à des milliers de km du phénomène d'origine,
- sont "indolores" ou presque à certains endroits, mais très significatives pour les habitants de certaines zones précises : sécheresses intenses en Indonésie (les dernières ont conduit à de gigantesques incendies, assez prévisibles en pareil cas car dans toute cette affaire il ne faut pas oublier la présence de l'homme), moussons diluviennes sur les Andes - avec glissements de terrain à la clé, disparition temporaire de populations de poissons au large du Pérou, et augmentation des cas de choléra au Bengladesh, entre autres choses.

Quid des ouragans tropicaux ?

Si nous regardons le cas particulier des ouragans tropicaux, l'une des conditions pour qu'un tel phénomène prenne naissance est que la température de surface de l'eau soit supérieure à 27°C (parce que la température conditionne la quantité d'eau qui peut s'évaporer par seconde, et cette quantité doit être supérieure à un certain seuil pour que l'ouragan puisse apparaître). A la première question qui est : la température de surface des océans tropicaux va-t-elle monter, la réponse est "très probablement oui".



Elévation de température moyenne de la surface de divers bassins océaniques en 2080 (par rapport à l'an 2000) avec une concentration atmosphérique en CO₂ qui augmente de 1% par an. NW Pacific signifie "Pacifique Nord Ouest", Atlantic parle de lui-même, et NE Pacific signifie "Pacifique Nord Est". Les sigles (CCCma, CSIRO, etc) désignent les divers modèles utilisés pour faire la simulation.

Toutes les simulations conduisent à une élévation de 1 à 2 degrés de la

température de surface des zones de formation des cyclones.

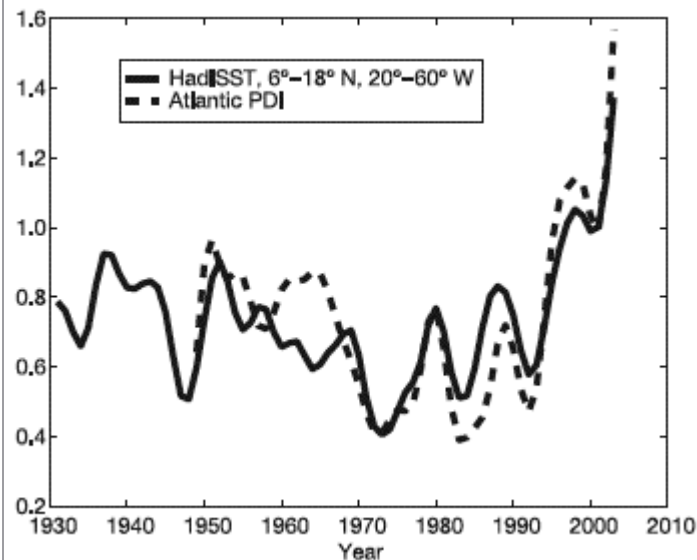
Source Knutson et al., Journal of Climate, 2004

Si la zone où cette température minimale est atteinte devient plus étendue, on est ensuite tenté de considérer que cela va avoir une incidence soit sur le nombre, soit sur la violence des ouragans, soit sur les deux. Quid du nombre, pour commencer ? Sur ce point, il nous faudra encore attendre pour savoir si cela monte, car les modèles ne donnent pas d'indication exploitable pour confirmer ou infirmer l'hypothèse d'une hausse pour l'instant (voir tableau plus bas).

Et quid de la violence ? La "pompe" qui met l'ouragan en mouvement est une convection très puissante de la surface - chaude - vers la haute atmosphère - froide (au début de la stratosphère la température de l'air est de l'ordre de -50 °C). Plus la différence de température entre la surface et le début de la stratosphère est importante, et plus la convection est puissante. Or il se trouve que le changement climatique devrait réchauffer la basse atmosphère, mais corrélativement refroidir la haute atmosphère. On peut donc craindre des ouragans plus violents dans le climat modifié, et cette éventualité est par contre considérée comme probable au vu des résultats actuels.

Deux publications scientifiques de 2005 viennent renforcer cette supposition. Le premier d'entre eux vient de l'analyse de l'énergie totale dissipée par les ouragans pendant la totalité de la saison cyclonique. Sur l'Atlantique nord, par exemple, la saison cyclonique va en gros de juin à octobre, et on peut évaluer l'énergie libérée par chaque cyclone pendant sa durée de vie, et en additionnant l'énergie totale par cyclone on obtient l'énergie libérée par la totalité des cyclones de la saison. Dans les graphiques ci-dessous, cette énergie totale des cyclones de la saison s'appelle le PDI (pour Power Dissipation Index, cochons de scientifiques qui publient toujours en anglais !).

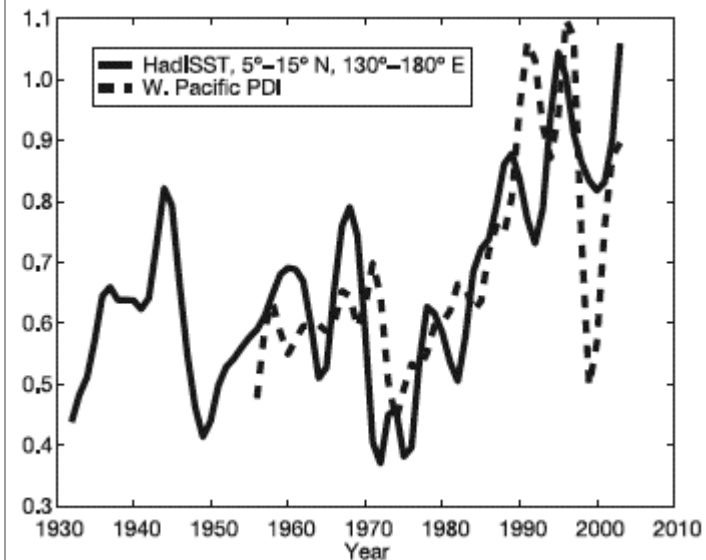
On peut ensuite regarder comment cet index (qui correspond peu ou prou au potentiel de destruction des ouragans, puisque plus ils libèrent d'énergie et plus la destruction est potentiellement importante) évolue au cours du temps, et voir si il y a un lien quelconque avec l'évolution de la température de l'océan tropical. Cette analyse sur l'Atlantique a aussi été conduite sur le Pacifique, et les résultats sont les courbes ci-dessous.



Variation de température moyenne de la surface de l'Atlantique tropical nord de 1930 à 2004 (on entend par "Atlantique tropical nord" l'océan compris entre le 6^e et le 18^e parallèle Nord, et 20 à 60 degrés de longitude ouest ; cette courbe porte le nom de HadSST), et index de dissipation de puissance sur la même période (Atlantic PDI). Les deux courbes ont été lissées, normalisées, et la courbe des températures décalée vers le haut pour faciliter l'observation de la corrélation.

L'énergie dissipée au cours de la saison cyclonique a quasiment doublé en 30 ans, et semble étroitement corrélée à l'évolution de la température moyenne de l'Atlantique tropical nord.

Source Emanuel, Nature, 4 Août 2005

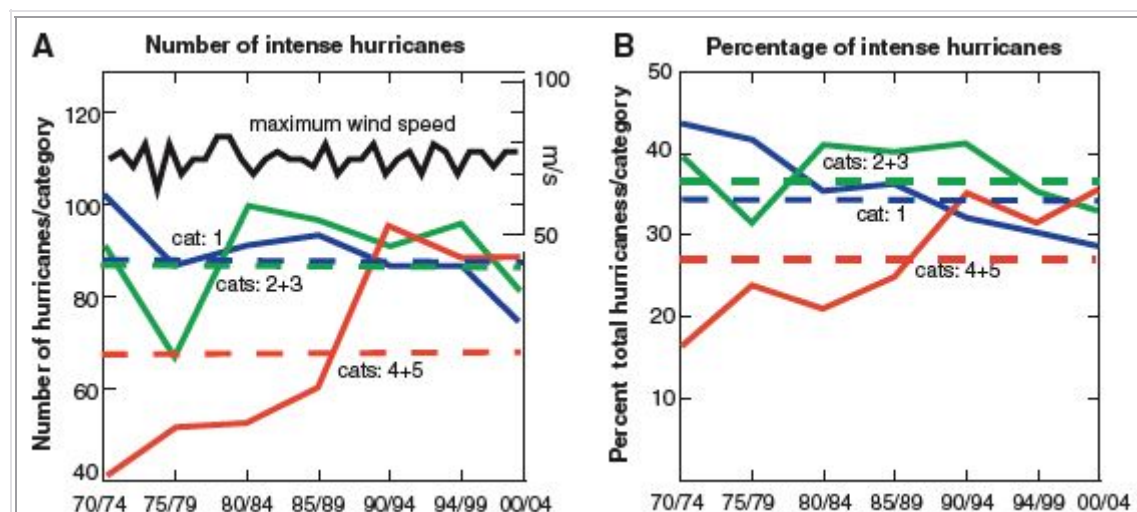


Même chose qu'à gauche, mais sur le bassin Pacifique Ouest (on entend par "Pacifique Ouest" l'océan compris entre le 5^e et le 15^e parallèle Nord, et 130 à 180 degrés de longitude est ; cette courbe porte aussi le nom de HadSST).

Source Emanuel, Nature, 4 Août 2005

Si la corrélation observée ne peut être qualifiée de loi (un(e) scientifique parle de "loi" quand il s'agit d'une relation de cause à effet qui est valable en toutes circonstances, et devient donc prédictive, ce qui n'est pas le cas ici), il y a quand même un parallélisme troublant dans les observations.

Un autre élément intéressant est que le nombre de cyclones puissants tend à augmenter proportionnellement au sein de l'ensemble des cyclones.



Nombre de cyclones (ou ouragans, ou typhons, c'est la même chose !) dans le monde, par catégories, selon la période (75/79 signifie de 1975 à 1979). A gauche, en valeur absolue (par exemple il y a eu 40 cyclones de catégories 4 et 5 dans le monde de 1970 à 1974), et à droite en part relative (de 1970 à 1974, les cyclones de catégorie 4 et 5 ont représenté 17% du total). La période étudiée est volontairement restreinte à la période avec des données d'observation par satellite.

Le nombre annuel moyen de cyclones de catégories 4 et 5 a plus que doublé en 30 ans, avec une part dans l'ensemble des cyclones qui est passée de 17%

à 35% environ.
Source Webster et al., Science, 16 septembre 2005

En conséquence, si on ne peut répondre formellement à la question de la fréquence ou de la violence des ouragans à l'avenir, les indices dont nous disposons dans un certain nombre de cas laissent cependant penser que les choses devraient plutôt évoluer dans le mauvais sens, notamment pour la violence, en période de réchauffement du climat. Cela ne préjuge pas de la manière dont les choses se passeront une fois la température stabilisée, mais [cela n'est pas pour demain !](#)

Que dit la communauté scientifique, exactement ?

L'état des connaissances sur la survenue, à l'avenir, de phénomènes extrêmes, ainsi que sur l'éventuel lien pouvant exister entre le [réchauffement climatique déjà constaté](#) et d'éventuels phénomènes extrêmes récents (comme ceux évoqués ci-dessous) peut être résumé dans ce tableau publié dans le résumé pour décideurs du rapport 2007 du [GIEC](#) :

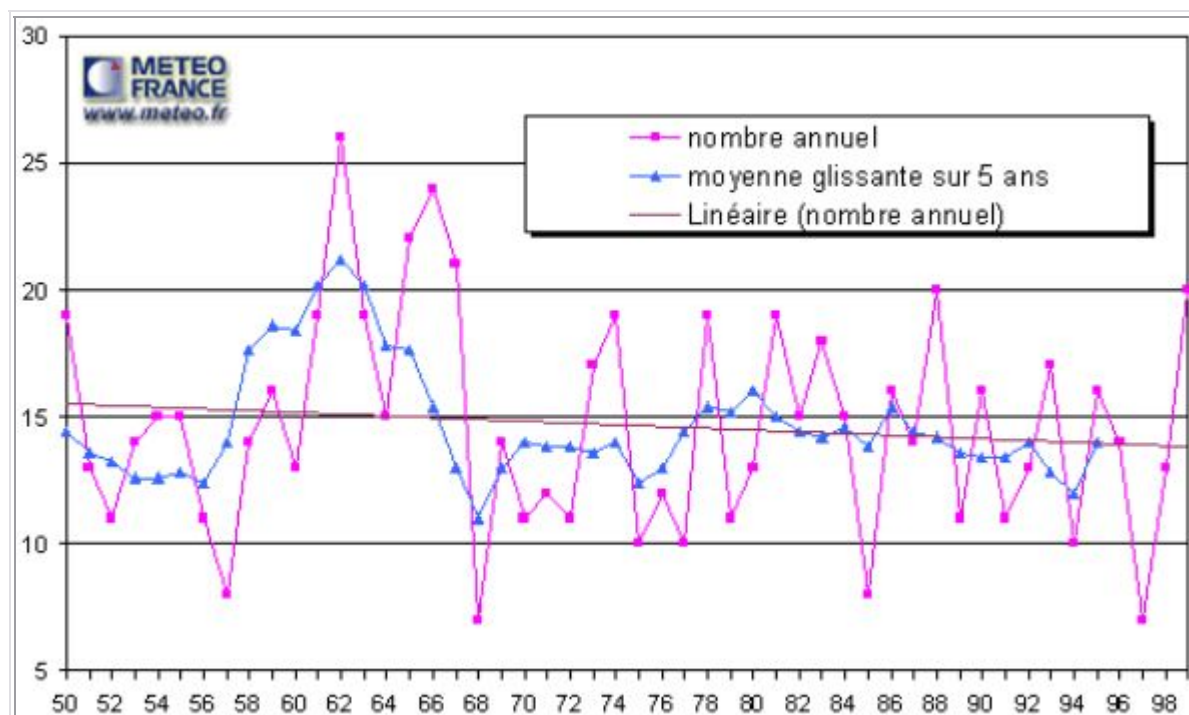
Evolution climatique concernée	Cette évolution s'est-elle déjà manifestée durant la deuxième moitié du XX^e siècle (après 1960) ?	L'homme a-t-il contribué à l'évolution constatée ?	Cette évolution est-elle simulée pour le XXI^e siècle avec les <u>scénarios d'émission</u> utilisés ?
Moins de jours froids au-dessus de la quasi-totalité des terres émergées	Très vraisemblablement oui (P > 90%)	Vraisemblablement oui (P > 66%)	Virtuellement certain (P > 99%)
Augmentation de la fréquence et de l'intensité des jours chauds au-dessus des continents	Très vraisemblablement oui (P > 90%)	Vraisemblablement oui (nuits) (P > 66%)	Virtuellement certain (P > 99%)

Augmentation des températures maximales, et des vagues de chaleur	Vraisemblablement oui (P > 66%)	Oui est plus vraisemblable que non (P > 50%)	Très vraisemblablement oui (P > 90%)
Augmentation des épisodes pluvieux intenses	Vraisemblablement oui (P > 66%)	Oui est plus vraisemblable que non (P > 50%)	Très vraisemblablement oui (P > 90%)
Augmentation de la surface touchée par les sécheresses	Vraisemblablement oui dans de nombreuses régions depuis 1970 (P > 66%)	Oui est plus vraisemblable que non (P > 50%)	Vraisemblablement oui (P > 66%)
Plus d'activité cyclonique intense aux tropiques	Vraisemblablement oui dans de nombreuses régions depuis 1970 (P > 66%)	Oui est plus vraisemblable que non (P > 50%)	Vraisemblablement oui (P > 66%)
Augmentation du nombre d'épisodes d'élévation extrême du niveau de la mer (hors tsunamis)	Vraisemblablement oui (P > 66%)	Oui est plus vraisemblable que non (P > 50%)	Vraisemblablement oui (P > 66%)

Les tempêtes de l'hiver 1999 en France sont-elles une conséquence du changement climatique ?

Conformément à ce qui précède, il est prématuré de dire que ces tempêtes - en fait des ouragans - sont une conséquence du réchauffement global (l'évolution évaluée ci-dessus concerne les ouragans tropicaux, pas les ouragans des moyennes latitudes).

Si nous nous tournons vers le passé pour savoir si il y a une tendance à la hausse du nombre de tempêtes, la réponse est négative pour l'instant :



Nombre de tempêtes observées en France de 1950 à 1999. Il est difficile de discerner une tendance franche concernant le nombre de tempêtes ou d'ouragans dans ces données. Par contre ce graphique ne dit rien sur la violence des événements, c'est-à-dire la vitesse maximale atteinte pour le vent.

Source : météo France

Comment pourrions nous être sûrs de "quelque chose" ? Nous aurions une certitude si nous pouvions faire l'expérience suivante : 50 fois nous remettons la terre en 1900, injectons des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, puis observons ce qui se passe, et ensuite nous remettons 50 fois la terre en 1900, n'injectons pas de gaz à effet de serre supplémentaires dans l'atmosphère, et observons aussi ce qui se passe.

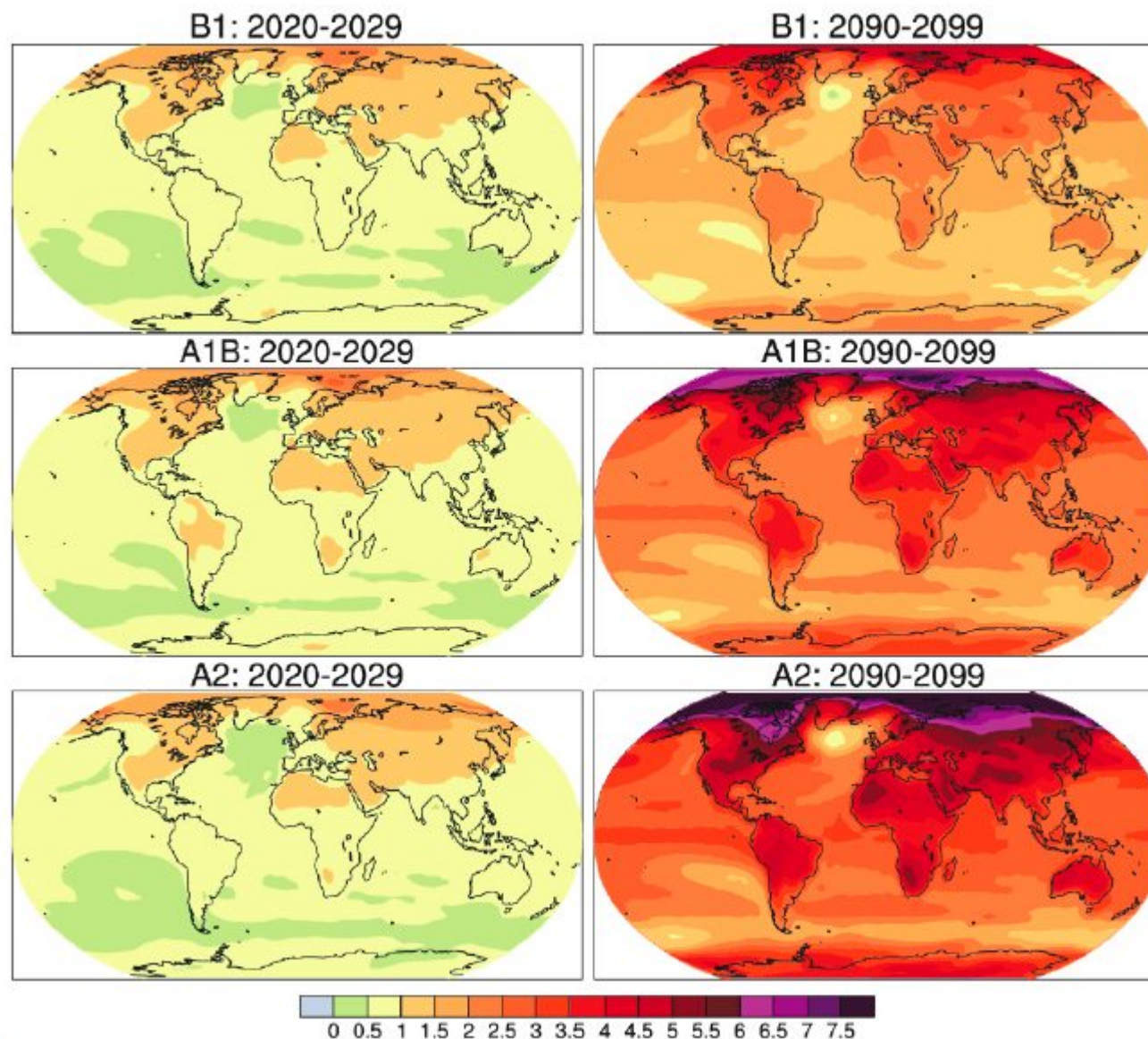
Si les 50 fois où nous avons injecté des gaz à effet de serre nous avons un ouragan en France en décembre 1999, l'affaire est entendue : sans notre action sur le climat, ces ouragans ne seraient pas arrivées, et nous pouvons donc les considérer comme des conséquences du changement climatique provoqué par l'homme.

Mais, bien sûr, il n'est pas possible de remonter le temps ! Personne ne peut donc faire la seule expérience qui permettrait d'avoir une réponse définitive à la question posée en ouverture de ce paragraphe. Tout ce que nous pouvons faire, alors, est de prendre un modèle climatique, de le perfectionner jusqu'à ce qu'il reproduise le climat actuel le mieux possible, puis simuler une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et regarder si nous obtenons alors plus d'ouragans que maintenant, ou des ouragans plus violents.

Et jusqu'à maintenant ce genre de simulation n'a pas été faite assez souvent, avec un protocole précis de comparaison des résultats, pour que l'on puisse avoir une réponse acceptable. Tout ce que l'on peut dire est que ce qui s'est passé en 1999 est cohérent avec les indications fournies par la modélisation, en particulier en ce qui concerne la partie "inondations" et "augmentation de l'intensité des ourgans dans leur zone de survenance".

On peut aussi être troublé par le rapprochement entre les conditions qui ont permis l'apparition de cette "tempête" et ce que prédisent certains modèles.

Le "moteur" des tempêtes est toujours une différence élevée de température ou d'humidité entre deux masses d'air (on parle de **gradient**). Or plusieurs simulations indiquent que le changement climatique ne devrait pas beaucoup réchauffer (voire refroidir) l'air situé au nord de l'Europe (en fait près du Groenland), par suite du ralentissement de la circulation océanique, mais réchauffer un peu plus l'air situé au sud de l'Europe.



©IPCC 2007: WG1-AR4

Elévations régionales de température moyenne par rapport à la période 1980-1999 pour la décennie 2020-2029 (à gauche) et pour la décennie 2090-2099 (à droite). Il s'agit d'une moyenne inter-modèles, établie à partir des sorties de 6 à 8 modèles. Ces élévations sont données, de haut en bas, pour trois scénarii différents, B1, A1B et A2, soit en gros des

Plus généralement, les modèles prédisent tous des augmentations de gradient ici ou là, mais pas aux mêmes endroits (ce qui est une [conséquence normale de leurs limites](#)). Si une future augmentation du nombre de tempêtes en France ne peut donc être prédite, du moins ce genre de phénomène donne une idée de ce qui pourrait arriver.

Deux derniers points sont d'importance :

➤ si ce genre de phénomène est déjà une conséquence du réchauffement, il y a probablement bien pire à venir, les modifications en cours étant destinées à [s'accentuer quoi que nous fassions](#) pendant encore un siècle au moins,

➤ Quand bien même il serait prouvé que les phénomènes extrêmes violents (de type ouragans) ne vont pas augmenter en fréquence ou en intensité, cela ne rend pas pour autant le phénomène du réchauffement climatique exempt de [risques](#) !

Les inondations de 2002 en Allemagne sont-elles liées au changement climatique ?

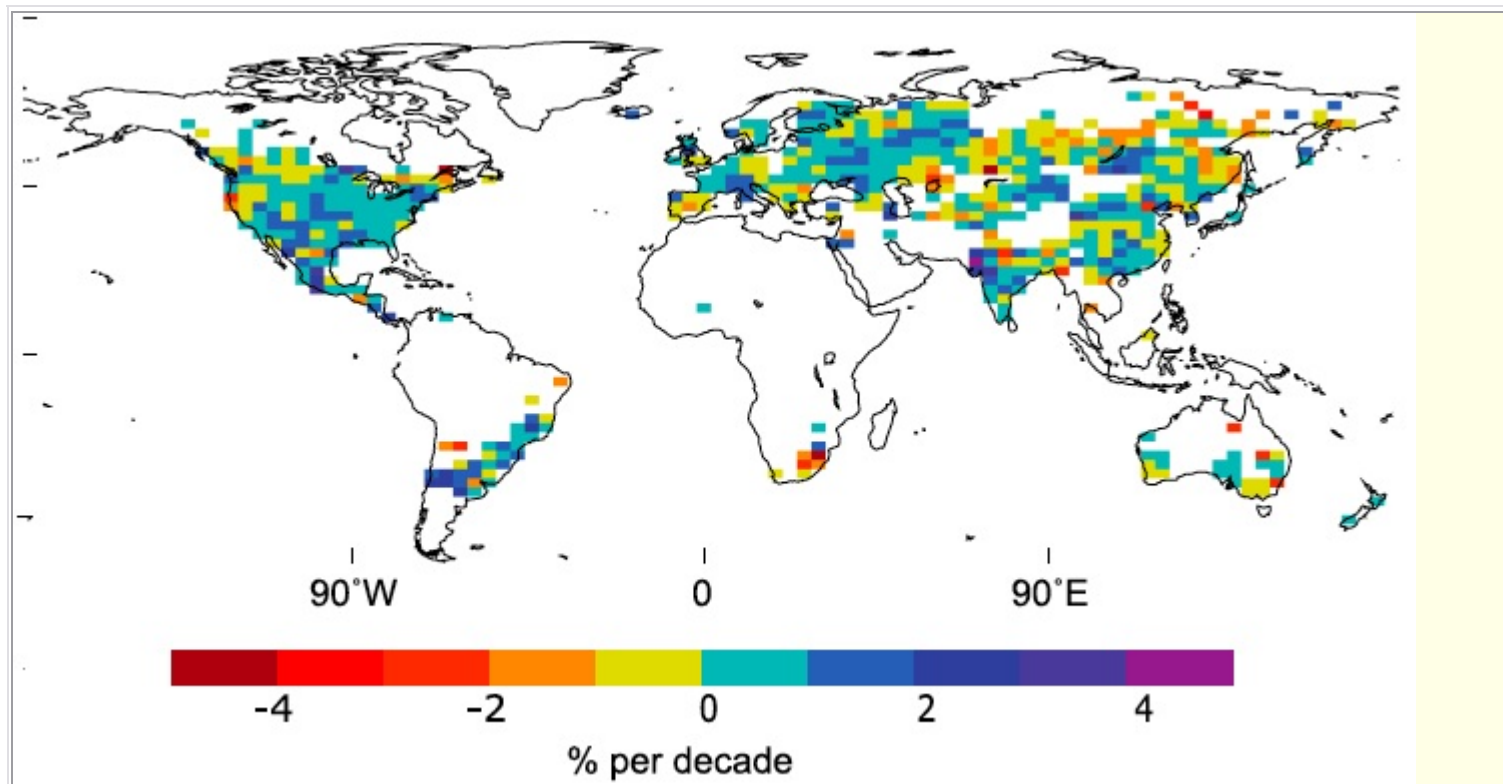
Même motif, même punition : pour en avoir le coeur net, il faudrait voir comment évoluerait une terre qui n'aurait pas reçu de gaz à effet de serre d'origine humaine depuis 1750 : c'est une expérience difficile à faire ! En outre il ne faut pas oublier que pour avoir des dégâts des eaux, il faut à la fois de l'eau et....quelque chose à inonder. Or l'urbanisation a toujours eu lieu le long des cours d'eau (pas une ville ou un village qui ne soit traversée par une rivière !), et les terrains non inondables ayant été utilisés en premier, il en résulte que les constructions neuves, par suite de la pression foncière, sont plus souvent qu'avant construites près de l'eau. De ce fait, à élévation égale du niveau de l'eau, il y a de plus en plus de choses à inonder : quand les dégâts augmentent, faire la part des choses entre ce qui est purement climatique et ce qui découle uniquement du changement d'occupation des sols n'est pas forcément aisé.

Ensuite il n'y a pas de lien simple entre la quantité d'eau qui tombe sur le bassin versant (ce sur quoi il y a des conclusions de disponibles) et le débit du fleuve en aval : la relation dépend de la vitesse à laquelle tombe l'eau, de ce qui recouvre le bassin versant, de la saison (si l'eau tombe sous forme de neige cela change un peu les choses...), des aménagements de la rivière (l'existence de bassins d'épanchement, ou, au contraire, un lit contraint par des digues modifient fortement les débits) ; bref

affirmer que les inondations en Allemagne de l'été 2002 ne seraient pas parvenues sans gaz à effet de serre supplémentaires serait bien osé (et aucun [scientifique](#) ne s'y risque).

Enfin sans avoir eu besoin de changer le climat mère Nature a quand même inondé Paris en 1910, et les mêmes précipitations en amont aujourd'hui provoqueraient une inondation à peine moins grave (les ouvrages de rétention ont une capacité limitée ; ils ne feraient baisser le niveau de la crue que de 20 à 30 cm) : crierait-on au changement climatique pour autant ?

Ce qui est le signe incontestable d'un changement de climat n'est donc pas tant l'existence de tels phénomènes que le changement de leur fréquence d'apparition. La certitude viendra éventuellement si, au bout d'un siècle, nous constatons que de telles inondations se produisent une fois tous les 10 ans au lieu de survenir une fois par siècle. Mais alors il sera [trop tard pour renverser la vapeur](#). Et sans déroger à la nécessaire prudence, il est quand même possible d'affirmer, vu que le changement climatique devrait se traduire par une [intensification du cycle de l'eau sur l'Europe du Nord](#), que ces inondations donnent une assez bonne idée (plus que pour les tempêtes) de ce qui va probablement arriver sur le Nord de l'Europe, à des degrés divers, à l'avenir (voir tableau ci-dessus). En outre, il est déjà "vraisemblable" qu'au cours des dernières décennies les épisodes pluvieux intenses ont augmenté.

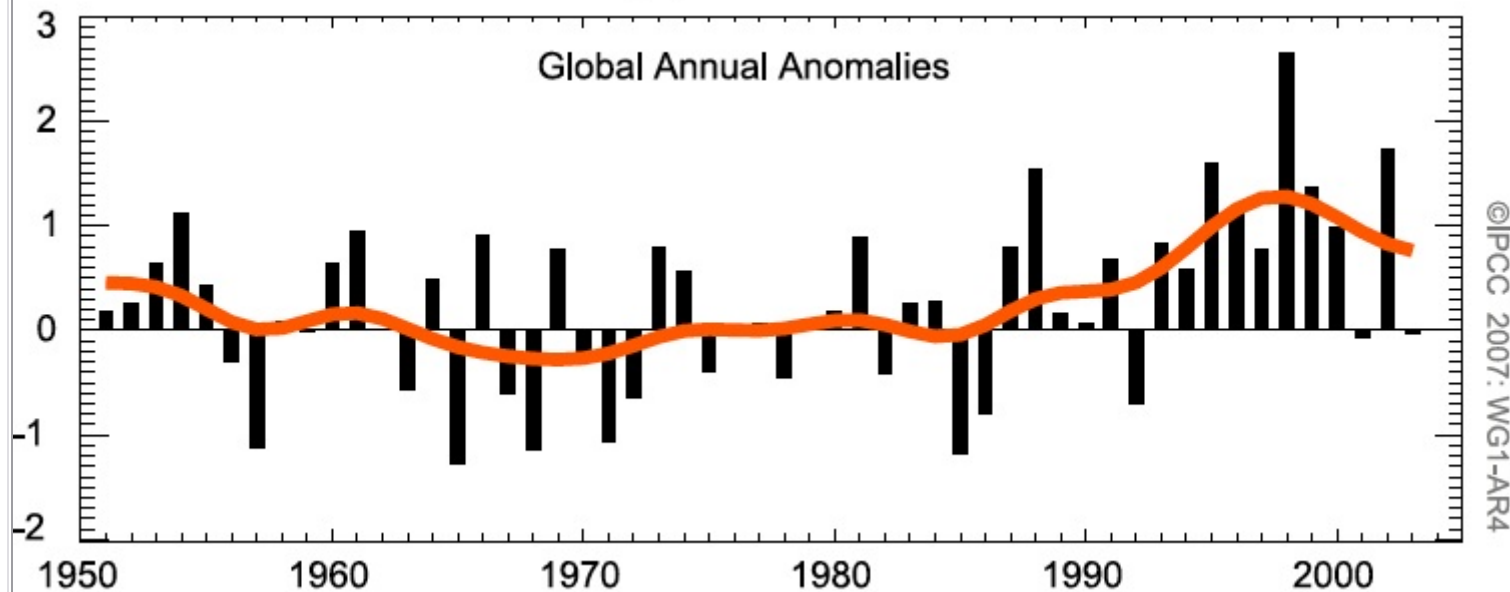


Evolution décennale moyenne, sur la période 1951 - 2003, de la contribution des jours très pluvieux au total des précipitations. Les zones laissées blanches sont des zones pour lesquelles l'information n'est pas disponible, faute de relevés (ou de relevés en nombre suffisant). Une augmentation de cette contribution signifie de la pluie qui tombe de manière de plus en plus "concentrée" sur des épisodes intenses, ce qui n'est pas nécessairement une bonne affaire pour la végétation et augmente le risque d'inondations toutes choses égales par ailleurs.

Ci-dessous, même information, mais pour l'ensemble des zones "non blanches" ci-dessus. Le zéro du graphique correspond à la valeur moyenne sur la période 1961-1990 de la contribution des jours très pluvieux à l'ensemble des précipitations, qui est de 22,5% (22,5% de la pluie totale tombe pendant des

épisodes dits "très pluvieux", qui sont ainsi désignés parce que la quantité de pluie qui tombe est plus importante que ce qui se produit pour 95% des épisodes pluvieux - désolé pour cette avalanche de chiffres !).

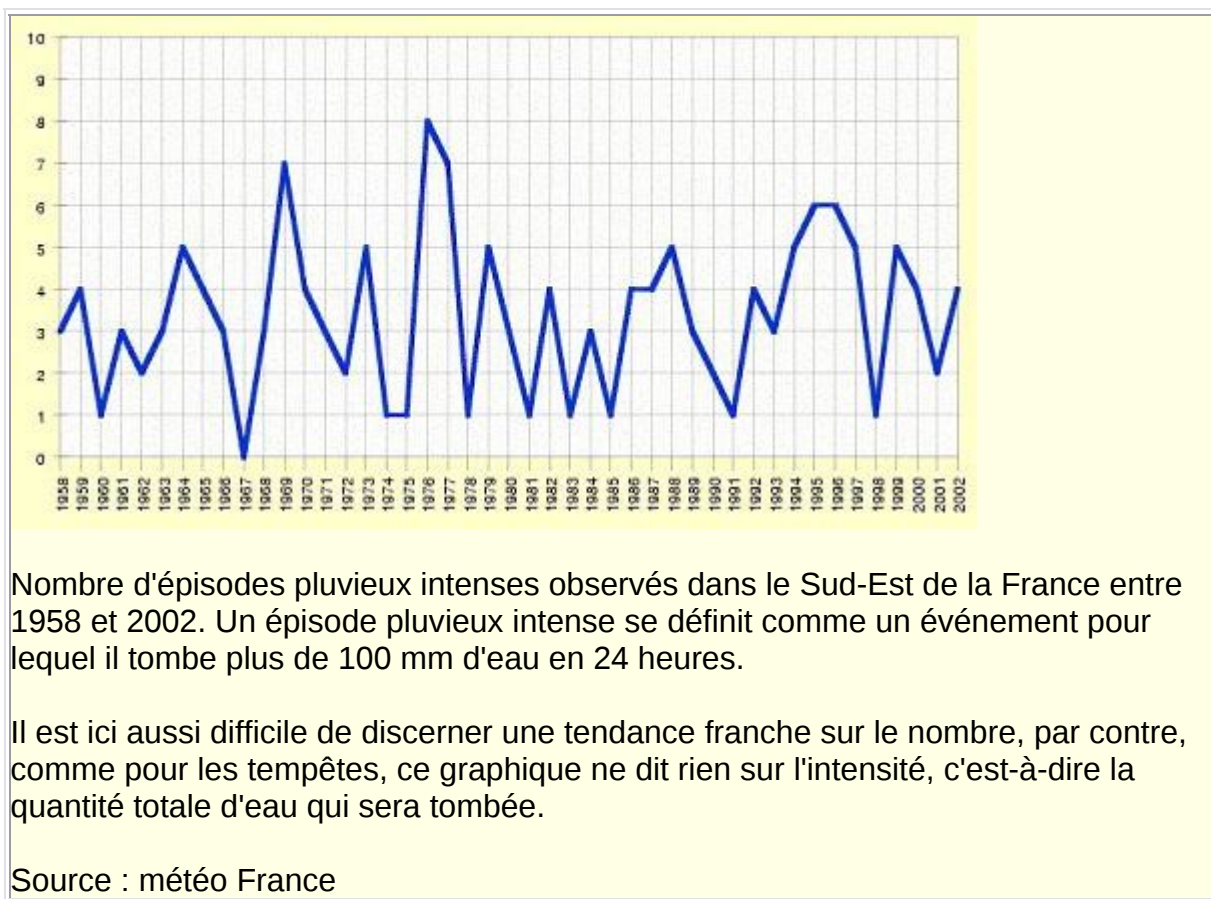
Les barres donnent la valeur pour l'année considérée de l'écart à cette moyenne de 22,5%, en % également. Par exemple, en 2000, les épisodes très pluvieux ont amené 1% de pluie en plus que la moyenne, donc cette année là 23,5% des précipitations ont eu lieu à l'occasion de tels épisodes (sur les zones où les séries longues sont disponibles).



Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007

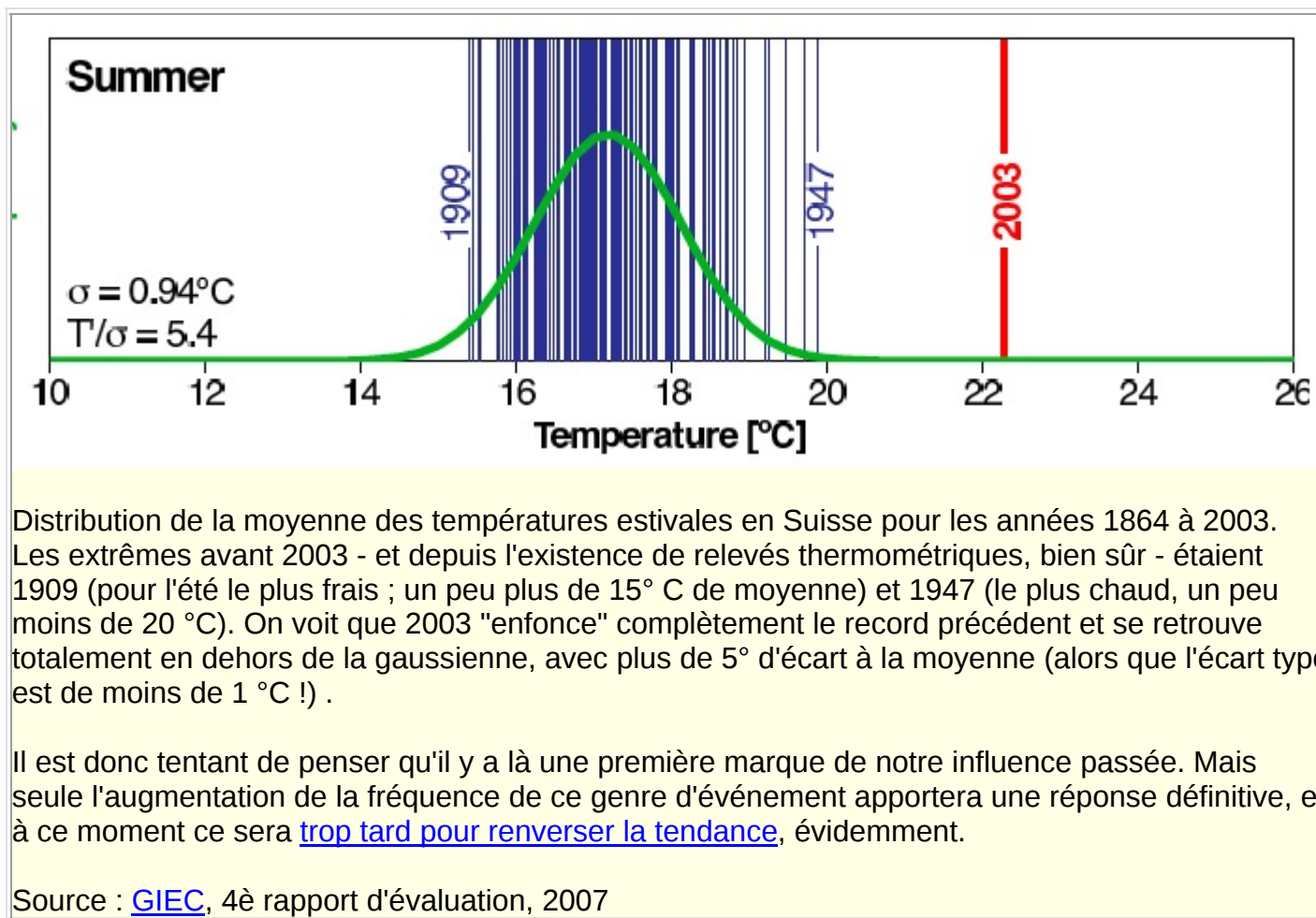
Comme pour les ouragans, la réponse concernant l'avenir (aurons nous plus d'épisodes pluvieux intenses, et donc d'inondations ?) est plutôt plus facile à donner que celle sur le passé, car l'influence relative des gaz à effet de serre est plus faible aujourd'hui que ce qu'elle [sera probablement plus tard](#).

Enfin une question similaire est souvent posée sur les précipitations intenses qui sont survenues dans le Sud de la France en 2002 et 2003.



La canicule de l'été 2003 en France est-elle etc... ?

Est-il besoin de préciser la réponse ? Encore une fois, ce n'est pas tant l'existence d'un été très chaud, même si des records ont été battus, qui permet de donner une réponse formelle pour établir un lien entre émissions passées et cette vague de chaleur.



Par contre, il est vraisemblable que cet épisode donne une bonne idée de ce qui nous attend de toute façon à l'avenir, et il est même vraisemblable que sur ce point précis (les vagues de chaleur) nous aurons bien pire plus tard (voir tableau ci-dessus), et "d'autant pire" que nous émettrons beaucoup de gaz à effet de serre dans les décennies qui viennent.

Les courants marins vont-il changer ?

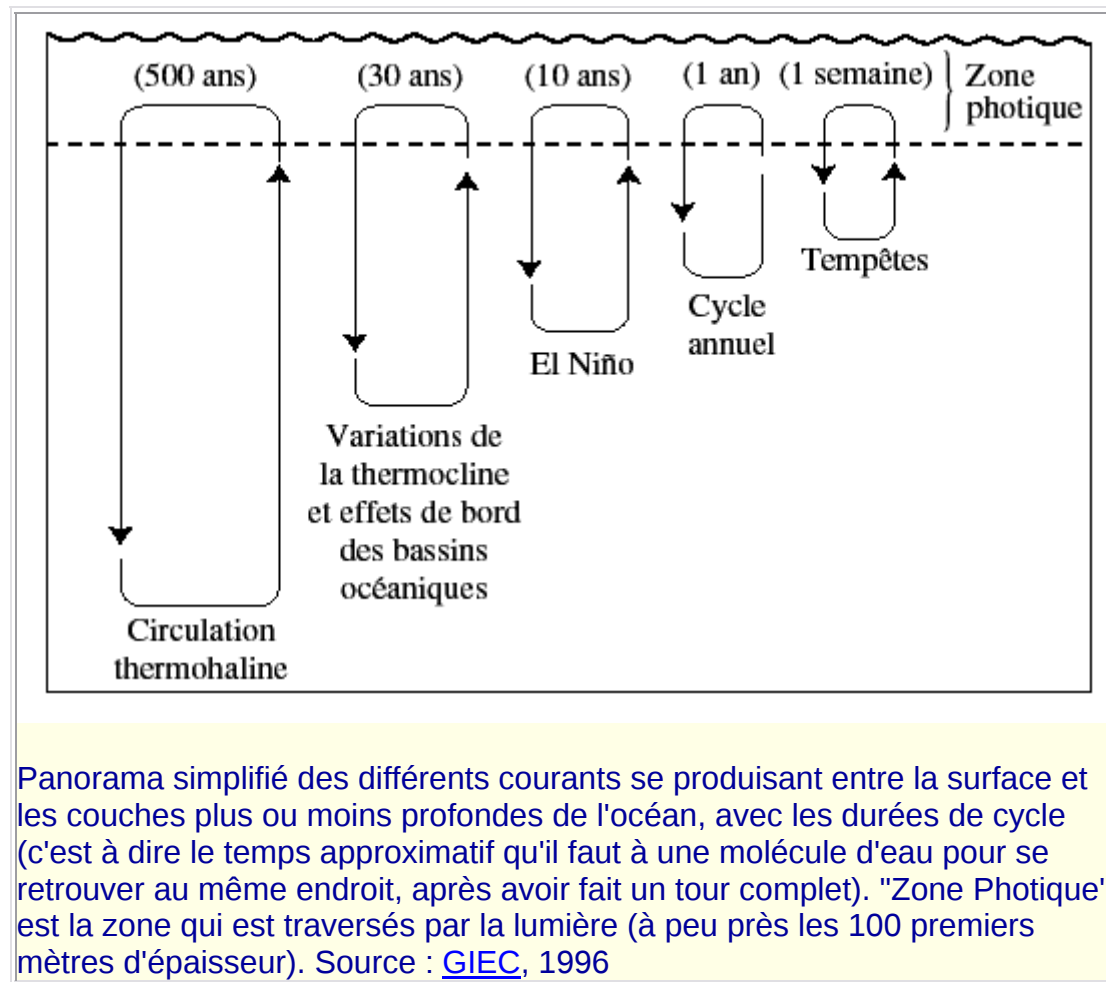
dernière version : septembre 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Cela est parfaitement possible, et pourrait engendrer des répercussions majeures sur le climat des zones cotières proches des courants concernés. En effet, les "grands" courants océaniques ne sont pas indifférents aux conditions climatiques des zones qu'ils traversent, et nous savons par ailleurs, par l'étude du passé, que certains de ces courants sont bien moins stables qu'il n'y paraît : le Gulf Stream, par exemple, a subi d'importantes modifications à de nombreuses reprises durant les 100.000 dernières années.

Il existe deux grandes catégories de courants marins :

- La circulation océanique horizontale, notamment celle à grande échelle, qui est généralement mise en mouvement par les vents (alizés, cinquantièmes hurlants, etc) comme par exemple le Gulf Stream ou le courant du Labrador. C'est celle-là que l'on voit dessinée sur les cartes.
- Les courants qui vont des profondeurs des océans vers la surface puis replongent vers les profondeurs. Ils sont mis en mouvement par des **différences de température** (l'eau froide est plus dense que l'eau chaude) et/ou de **salinité** (l'eau salée est plus dense que l'eau douce) entre les différentes couches de l'océan. Lorsque la circulation horizontale amène de l'eau dense au-dessus d'une couche qui l'est moins, l'eau de surface plonge alors vers les profondeurs et met en mouvement une telle circulation "verticale". Les courants les plus profonds de cette catégorie portent le nom de **courants thermohalins** (voir ci-dessous), et d'autres, qui vont un peu moins en profondeur, portent le nom de circulation **thermocline**. Il est facile de voir que l'on retrouve dans ces deux termes la racine "thermo", qui désigne la chaleur.



L'un de ces courants est particulièrement important pour l'océan mondial : il s'agit de la plongée des eaux en mer de Norvège et en mer du Labrador, durant l'hiver. Les eaux de surface qui remontent l'Atlantique par le biais du Gulf Stream se chargent en sel, à cause de l'évaporation (une partie de l'eau évaporée retombe sur l'océan, bien sûr, mais une autre partie retombe sur les

continents et n'est restituée que "plus tard"), et deviennent plus froides, chacun de ces phénomènes contribuant à les rendre plus denses.

Au moment de l'hiver, près du pôle Nord, une partie du sel contenu dans l'eau de mer qui gèle (pour former la banquise) est expulsé, et renforce encore la salinité de l'eau de mer qui ne gèle pas, laquelle se met alors à être tellement dense qu'elle "plonge" vers les profondeurs. On parle de formation d'eaux profondes pour désigner ce phénomène.

Le point capital, c'est que les courants de surface de l'océan mondial et cette plongée des eaux dans la mer de Norvège sont interconnectés : ce courant thermohalin sert de "moteur" à une partie de la circulation océanique globale, ce qui est illustré par le petit graphique ci-dessous.

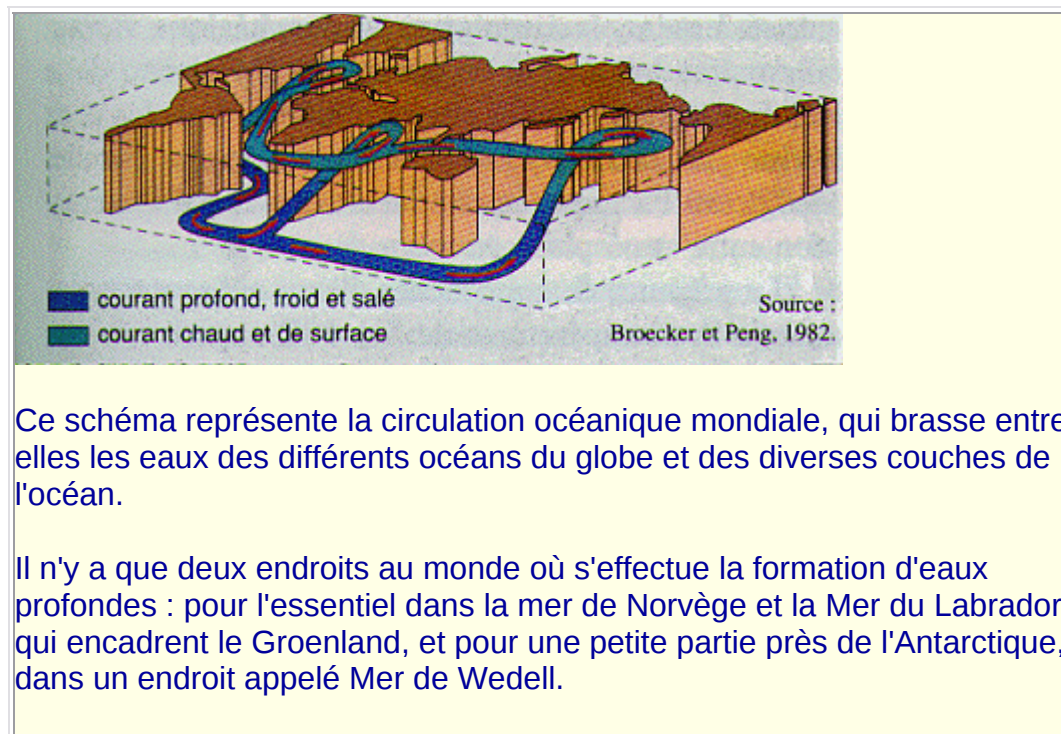


Image reprise de "Système Terre", d'Ichtiague RASOOL, Collection
Dominos, Flammarion, 1993

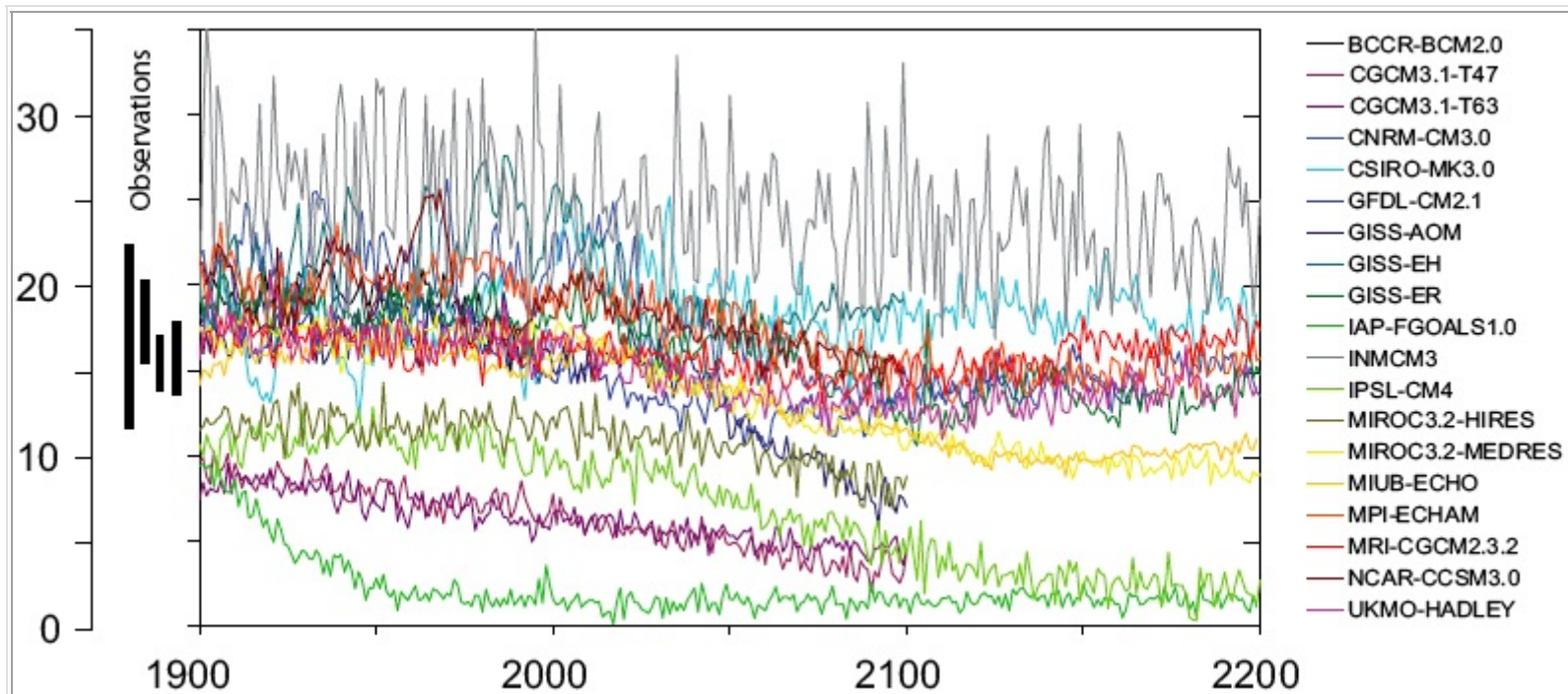
Or ces courants verticaux (on parle aussi de **courants convectifs**) sont très sensibles à des petites variations locales de température. Par exemple, l'une des premières étapes du phénomène El Niño est un réchauffement modeste (2 ou 3°C) de la température de surface du Pacifique Est, et cela suffit pour affecter significativement la circulation **thermocline** à cet endroit là, avec des répercussions importantes sur les ressources en poissons et des répercussions majeures sur le climat des pays andins.

Incidentement, notons que d'augmenter la température de surface de 2 à 3°C sur une zone du Pacifique suffit aussi pour engendrer des catastrophes diverses à des milliers de km de là, ce qui illustre toute la difficulté qu'il y a à prévoir précisément l'ampleur et la localisation des éventuelles conséquences "catastrophiques" dans le cadre du **réchauffement climatique en cours**.

Pour en revenir aux courants, une perturbation de la circulation thermohaline, voire son arrêt, pourrait parfaitement se produire à l'avenir. En effet, nous avons vu que :

- le réchauffement sera **particulièrement marqué près des pôles**, et concernera donc la mer de Norvège de manière significative, or si l'eau s'y réchauffe en surface elle deviendra moins dense,
- il faut que de la banquise se forme pour libérer un surplus de sel augmentant brusquement la densité de l'eau de surface, or si la formation de banquise devient de plus en plus difficile il y aura moins de sel supplémentaire disponible,
- le changement climatique devrait se traduire par une **augmentation de la pluviométrie aux hautes latitudes** (notamment dans le Nord de l'Europe et du Canada), ce qui va provoquer un apport d'eau douce dans l'Atlantique Nord qui ne sera peut-être pas compensé par l'évaporation supplémentaire, l'ensemble pouvant diminuer la salinité et donc la densité de l'eau de surface sous ces latitudes.

Ces trois phénomènes pourraient atténuer, ou supprimer, la formation d'eaux profondes dans les mers qui bordent le Groenland, et déstabiliser par la suite l'ensemble de la circulation mondiale.



Evolution simulée du flux nord atlantique (appelé overturning en anglais, et qui se mesure en Sverdrups, du nom d'un pionnier du domaine, en abrégé Sv ; 1 Sv = 1.000.000 m³/s), selon les modèles (dont les sigles - barbares ! - sont en légende), avec des émissions de gaz à effet de serre qui doublent jusqu'en 2100 puis une concentration qui reste constante jusqu'en 2200. La circulation actuelle est de 12 à 25 Sv (cette fourchette est donnée par les barres noires situées à droite, juste à côté de l'échelle). Attention ! les simulations partent de 1900, pour voir si elles reflètent correctement les observations entre 1900 et 2000.

Il est facile de constater que les simulations qui prédisent un effondrement de la circulation nord-atlantique avant 2100 sont déjà "hors observations" en 2000. Les simulations les plus pessimistes parmi celles restant compatibles avec les observations en 2000 pronostiquent une diminution de 50% du flux Nord Atlantique, ce qui est déjà considérable, mais pas d'arrêt brutal.

Lorsque la simulation va au-delà de 2100, avec une concentration en gaz à effet de serre qui ne change plus, les évolutions ne sont pas convergentes : certaines simulations "voient" une réversibilité - la circulation Nord-Atlantique augmente à nouveau, alors que d'autres voient l'affaiblissement perdurer.

Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007

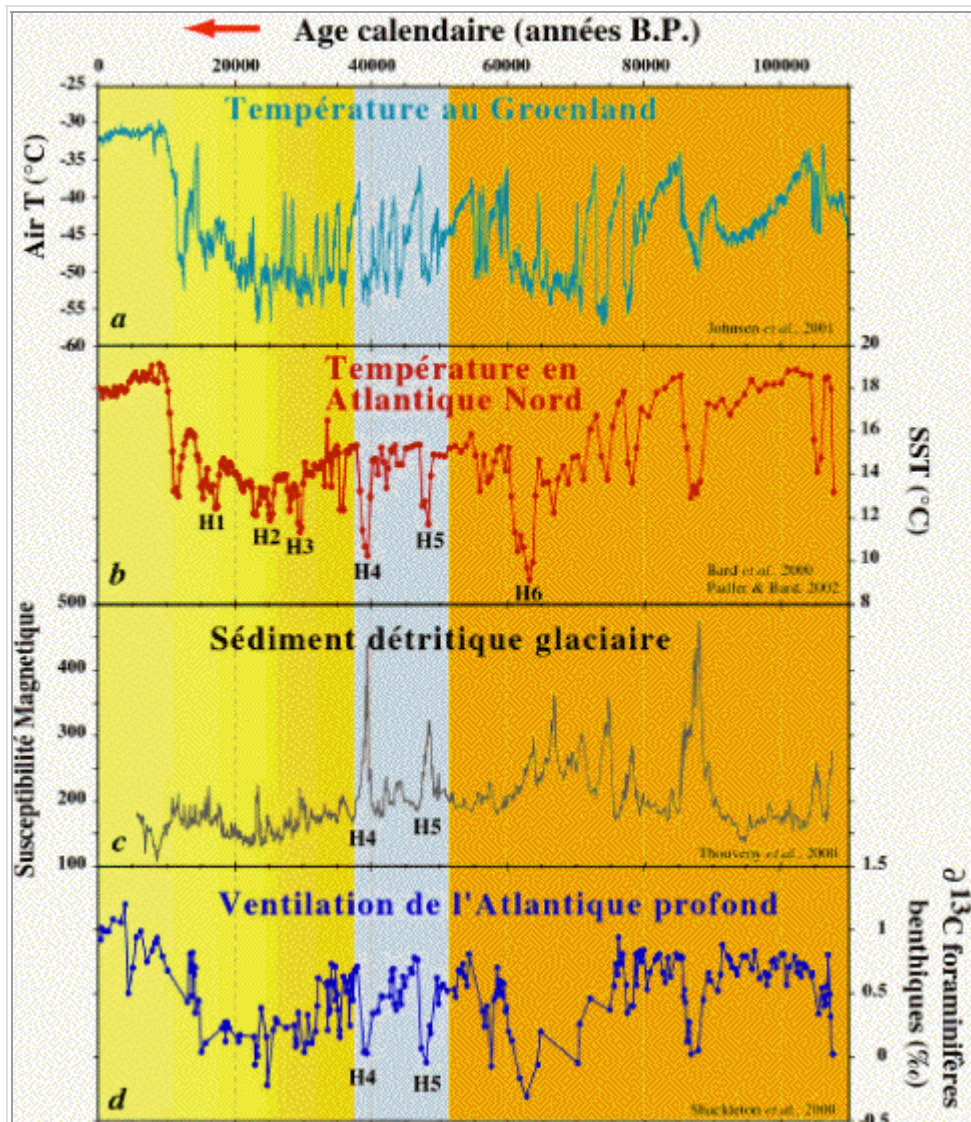
Y a-t-il vraiment un risque sérieux de ralentir ou supprimer la circulation dans l'Atlantique Nord ? La raison pour laquelle cette éventualité est si souvent évoquée est tout simplement que de tels phénomènes se sont produits à de très nombreuses reprises durant la dernière ère glaciaire, ainsi que pendant la dernière déglaciation (le dernier épisode de ralentissement de la circulation s'est produit il y a 8.000 ans, quand la déglaciation avait déjà commencé depuis plus de 10.000 ans).

La cause de ces épisodes passés a le plus souvent été une gigantesque débâcle d'icebergs au Groenland et sur la Canada actuel (d'où leur apparition en période glaciaire) qui a amené une quantité considérable d'eau douce dans l'Atlantique, ce qui a arrêté la plongée des eaux de la mer de Norvège pour les raisons exposées plus haut. Le dernier épisode (-8.000 ans) a eu une cause un peu différente : le déversement dans l'Atlantique d'un immense lac d'eau douce situé sur le continent Nord Américain, lac d'eau douce qui contenait probablement une partie des eaux de fonte de la calotte qui recouvrait le Canada lors de la dernière glaciation (calotte appelée Laurentide).

Dans tous les cas de figure l'enchaînement a été le même : un apport d'eau douce supplémentaire sur l'Atlantique Nord empêche la formation d'eaux profondes, ce qui, par contrecoup, provoque un très fort ralentissement du Gulf Stream, car cette circulation thermohaline (la plongée des eaux) sert de "pompe aspirante" et attire les eaux de surface tout au nord du bassin Atlantique. Ce ralentissement du Gulf Stream a à son tour engendré une baisse massive des températures en Europe et sur la côte Est des Etats-Unis (5 à 6°C de baisse de la moyenne annuelle), ainsi qu'une division de la pluviométrie d'un facteur 2 (voire plus en certains endroits), le tout survenant en quelques décennies seulement.

Ces phénomènes ont reçu le nom de "surprises climatiques" et ont profondément déstabilisé les conditions de vie sur les deux rives de l'Atlantique.

Variations rapides de température mises en évidence durant les 100.000 dernières années et explications. Source : E. Bard, Climate Shock: Abrupt Changes over Millennial Time Scales, [Physics Today](#), décembre 2002 (article relativement accessible pour un profane, donc hautement recommandé à toute personne intéressée par le sujet).



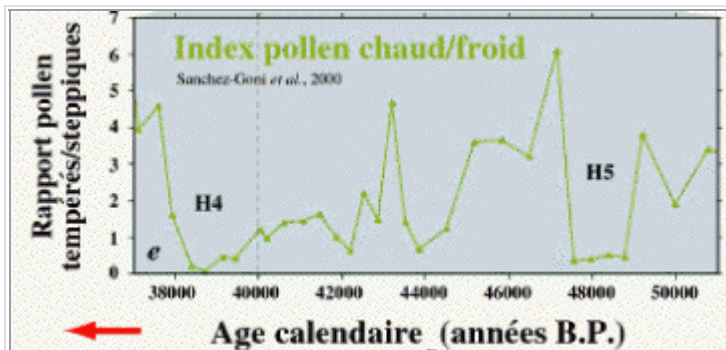
La courbe du haut (Johnsen & al., 2001) montre la température moyenne de l'air au Groenland reconstituée à partir

de la proportion d'oxygène 18 ou de deutérium dans la glace (des explications peuvent se trouver sur une [autre page de ce site web](#)). Elle met en évidence des variations de 15 à 20 °C de la température moyenne au-dessus du Groenland. Les réchauffements brutaux sont appelés événements de Dansgaard-Oeschger, du nom des scientifiques qui les ont découverts.

La courbe du milieu (Bard & al., 2000 ; Pailler & Bard, 2002) montre qu'au même moment des variations de 5 °C ou plus de la température moyenne de surface de l'Atlantique Nord sont survenues ; les épisodes de refroidissement s'appellent des événements de Heinrich. Les températures sont reconstituées à partir de la conformation de certaines molécules - les alkénones - trouvées dans les sédiments marins, et qui proviennent d'algues ayant vécu en surface. Il se trouve que les liaisons chimiques de ces molécules sont différentes selon la température de l'eau de mer dans laquelle vivaient les algues ; l'analyse de ces liaisons permet donc de reconstruire la température de surface de l'eau dans le passé.

La 3^e courbe partant du haut (Thouveny & al.) montre que la plupart de ces variations de température sont concomitantes d'une accumulation sur le fond de l'océan de sédiments "détritiques glaciaires" (pics vers le haut), lesquels viennent des continents. Ces sédiments "détritiques glaciaires" sont des petits cailloux qui se sont incrustés sous les glaciers du Groenland ou du Laurentide (une énorme calotte glaciaire qui reposait sur ce qui est maintenant le Canada) et qui sont restés "collés" au moment où les extrémités de ces glaciers ont expulsé des icebergs vers l'océan. Ces "petits cailloux" sont ensuite tombés sur le fond de l'océan au fur et à mesure que les icebergs fondaient. En dehors des débâcles glaciaires, la quantité d'icebergs expulsés est moindre, et donc cette espèce de sédiments se dépose en moins grandes quantités sur le fond de l'océan.

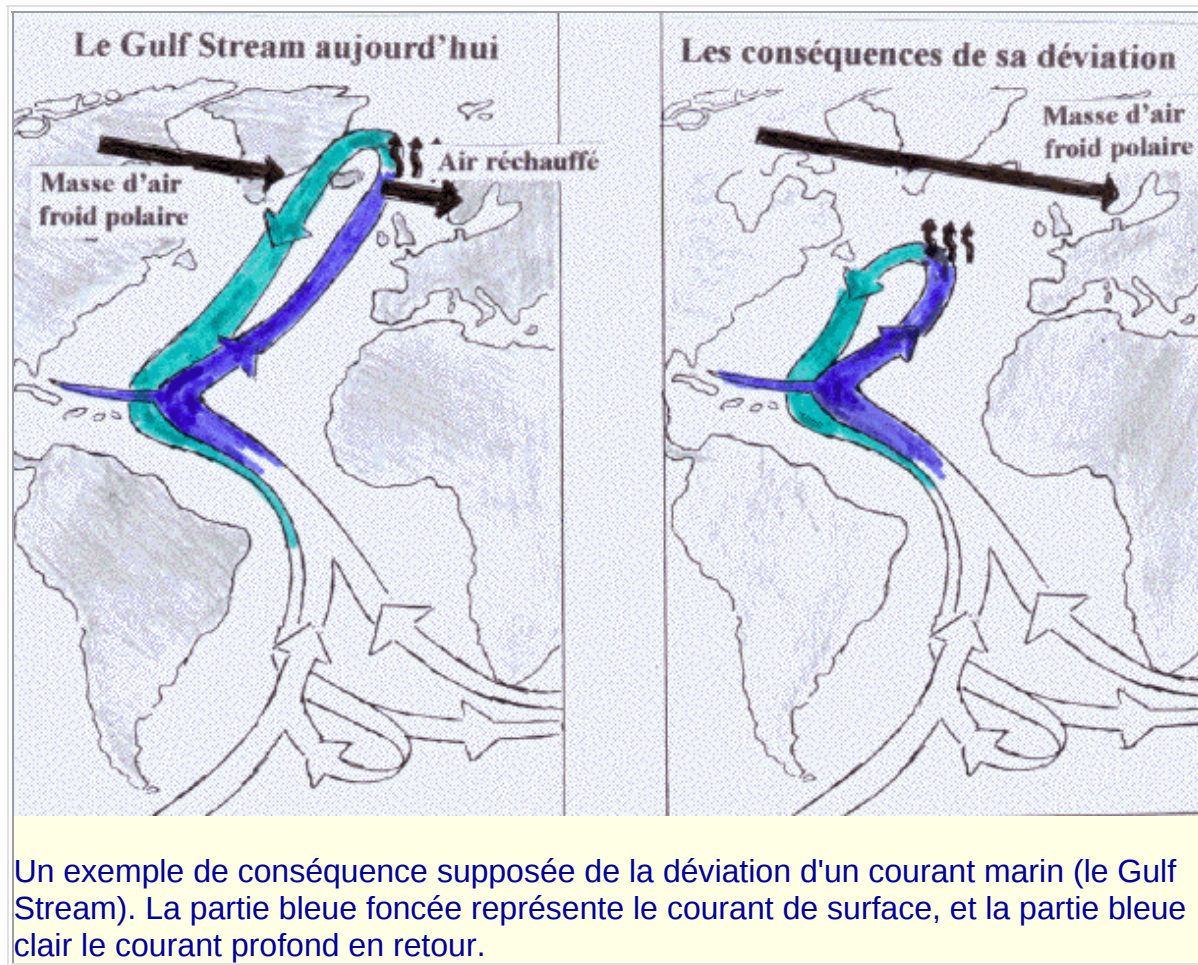
La courbe du bas de l'ensemble ci-dessus (Shackelton & al., 2000) montre que la ventilation (c'est à dire l'apport d'oxygène) de l'océan Atlantique profond aux époques de ces débâcles a fortement diminué (pics vers le bas). Cette ventilation est reconstituée en analysant les proportions respectives de carbone 12 et carbone 13 dans les sédiments, sachant qu'en fonction de la teneur en oxygène dans l'eau le métabolisme de petits animaux marins profonds (les foraminifères benthiques) privilégie plus ou moins le carbone 13 dans la formation de leur coquille. Cette diminution de la ventilation suggère un ralentissement de la circulation océanique profonde (celle qui suit la formation d'eaux profondes), précisément à l'origine de l'apport d'oxygène dans les fonds.



Cette courbe (Sanchez & al. 2000) montre que les baisses de température de l'eau de surface, liées aux événements de Heinrich (ceux là qui sont produits par les débâcles massives d'icebergs), se retrouvent aussi sur les continents (par exemple H4 aux alentours de -38.500 ans, ou H5 aux alentours de -48.000 ans, aussi visibles sur la figure précédente). Les pollens de l'époque (trouvés dans les sédiments lacustres, c'est à dire prélevés au fond des lacs) ont très rapidement changé de nature (espèces tempérées <-> espèces "steppiques") en réponse à ces modifications brusques du climat.

La diminution rapide - pouvant aller jusqu'à la disparition régionale - des espèces tempérées en place est clairement visible à la suite du refroidissement.

La question posée est donc la suivante : est-ce que, à l'avenir, l'augmentation de la pluviométrie et de la température sur l'Atlantique Nord pourrait amener une telle "surprise", avec, dans un contexte de réchauffement global de la planète, une baisse brutale - et peut-être catastrophique - des températures près du lieu de survenance ?



Si un tel épisode survenait à l'avenir, il est difficile de dire si il entraînerait une température plus basse qu'aujourd'hui en Europe (cela dépend du moment auquel il se produit, parce que dans un premier temps [la température moyenne en Europe va monter](#)), et surtout il est difficile de savoir ce qu'il adviendrait de la pluviosité par rapport à aujourd'hui. Il est clair que si un tel épisode

engendrait une baisse de 30% des précipitations en Europe de l'Ouest, cela ne serait pas sans conséquence sur les ressources alimentaires....

Le Pentagone a-t-il dit que le Gulf Stream allait s'arrêter en 2020 ?

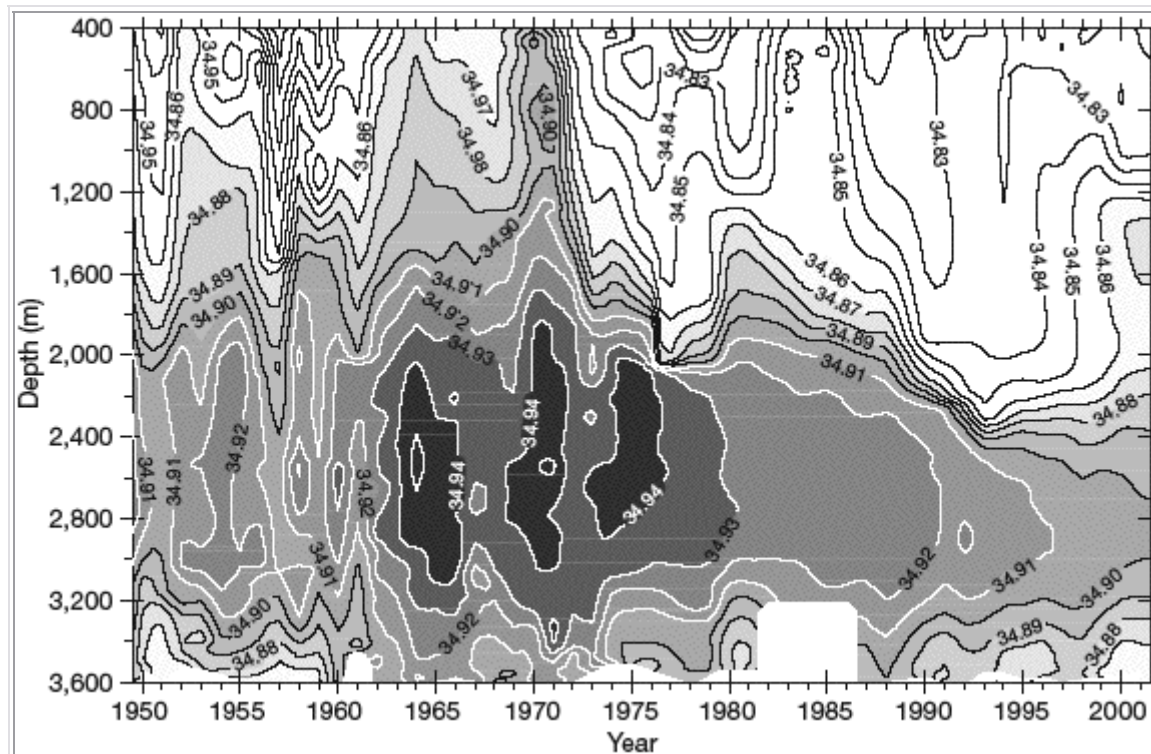
Cette éventualité d'un arrêt du Gulf Stream a servi de base à un "rapport" réalisé pour le Pentagone (le ministère de la Défense des Etats-Unis) et qui a fait grand bruit dans la presse début 2004. Certains journalistes n'ont pas hésité à expliquer que le Pentagone "prévenait" Bush que les perturbations climatiques allaient être terribles dans pas très longtemps, posant à bref délai de redoutables problèmes à la sécurité intérieure des USA.

En fait ce rapport n'est pas un exercice de prévision, mais un exercice de "climat fiction" : il décrit des enchaînements qui pourraient se produire si un tel arrêt de la circulation thermohaline se produisait dès 2020. L'essentiel du document consiste ensuite en une énumération, région par région, des conséquences possibles d'un tel événement. Ce qui est indiqué dans ce papier, **à la condition que l'hypothèse de départ soit valable**, est alors une description plausible - parmi d'autres - de ce qui pourrait se passer.

Mais la question essentielle, car c'est de là que part tout le reste du document, est la suivante : un tel arrêt de la circulation thermohaline en 2020 est-il possible et/ou probable ? Il y a donc deux manières de discuter l'hypothèse de départ :

➤ cet arrêt en 2020 est-il seulement **possible** ? Les éléments du dossier scientifique, aujourd'hui, ne permettent pas d'exclure totalement que le Gulf Stream commence à s'arrêter d'ici à 2020, mais "ne pas totalement exclure" est bien évidemment très différent de "il est probable que cela arrive" ! Les auteurs du rapport du Pentagone citent notamment deux publications scientifiques dont les résultats sont cohérents avec un ralentissement qui aurait déjà commencé :

➤ le premier note une diminution de la salinité des eaux profondes de la mer du Labrador - où se forme une partie des eaux profondes - depuis quelques décennies (ci-dessous).



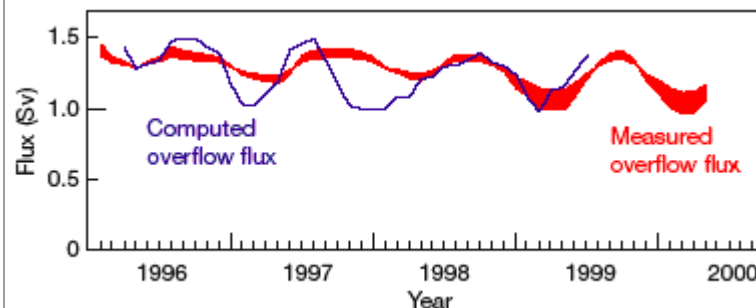
La figure ci-dessus montre la salinité de l'eau de la partie centrale de la mer du Labrador, en fonction de la profondeur (axe vertical) et du temps (axe horizontal). La diminution de la salinité dans la partie la plus profonde de la colonne d'eau est bien visible, et l'une des hypothèses possibles est le ralentissement de la formation d'eau profonde, qui est la partie descendante de la circulation thermohaline.

Source : Dickson & al., Nature, 2002.

- La seconde publication souligne que la circulation profonde provenant de la mer de Norvège (où se forme une autre partie des eaux profondes), et qui s'engouffre dans l'Atlantique profond, semble diminuer actuellement :



La formation d'eaux profondes se passe pour partie dans la mer de Norvège, qui se trouve entre le Groenland et la Norvège. Les eaux profondes passent alors vers l'Atlantique à travers divers détroits : entre le Groenland et l'Islande, et entre l'Islande et l'Ecosse (SC sur le schéma). On peut mesurer les flux à ces endroits là, ce qu'ont fait les auteurs de la publication.



La figure ci-dessus montre le débit de l'eau qui passe à travers le détroit des Féroé (FBC sur la figure de gauche, pour Faroe Bank Chanel) sous l'isotherme 0.3 °C.

La courbe rouge est obtenue avec des mesures directes d'appareils mouillés dans le détroit, et la courbe bleue résulte d'un calcul obtenu avec d'autres données. La largeur de la courbe rouge reflète l'incertitude du résultat obtenu avec les mesures, car il est nécessaire de faire un calcul intermédiaire prenant en compte un paramètre qui présente une petite incertitude.

Le débit montre une tendance à la baisse, estimée entre 2% et 4% par an, selon les suppositions, depuis le milieu des années 1990.

Source : Hansen & al, Nature, 2001

- La troisième publication (Rahmstorf & al., Climatic Change, 1999) présente les résultats d'un modèle qui conduit à un arrêt de la circulation thermohaline (en deux siècles, quand même !) avec un apport supplémentaire relativement modeste d'eau douce dans l'Atlantique Nord.

➤ la deuxième manière de discuter l'hypothèse du Pentagone, maintenant, est de se demander si l'enclenchement d'un tel arrêt de la circulation thermohaline en 2020 est une éventualité "probable", c'est-à-dire que le risque que cela arrive est élevé.

La réponse est ici moins "pessimiste" : les [modèles](#) couplés océan-atmosphère, en 3 dimensions, ne montrent pas d'arrêt de la circulation Nord-Atlantique avec les conditions climatiques que nous aurons en 2020, ou même en 2100 (voir ci-dessus). En d'autres termes, le résultat obtenu par Rahmstorf & al. ne fait pas aujourd'hui consensus dans la communauté scientifique.

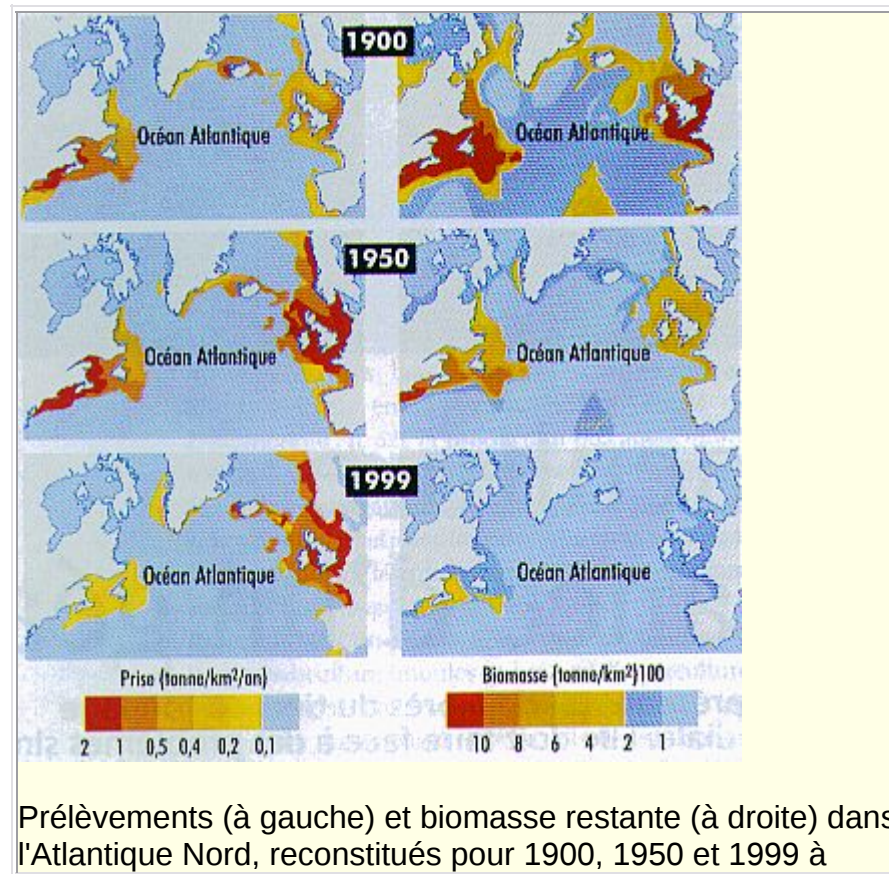
Reste que, ici aussi, nous en sommes réduits à discuter sur la base de la modélisation. En effet, les arrêts du Gulf Stream qui se sont produits dans le passé (le dernier il y a 8.000 ans, voir ci-dessus) ont fait suite à de très gros apports d'eau douce à la surface de l'Atlantique Nord, bien plus importants que ce que nous aurons vraisemblablement en 2020. Nous savons donc que le seuil de déclenchement d'un tel événement est "quelque part" entre ce que nous avons aujourd'hui et ce que nous avons eu il y a 8.000 ans, mais la science ne permet pas - et le pourra-t-elle un jour ? - de dire avec précision où se situe ce seuil. En outre, dans le passé l'apport d'eau douce a été la principale modification pour l'Atlantique, qui n'a pas connu par ailleurs un réchauffement climatique préalable comme celui [nous nous apprêtons probablement à connaître](#).

Pour faire la part des choses à l'avenir, et tenter de préciser le seuil de déclenchement entre les conditions actuelles et des conditions très modifiées (et il n'est pas dit que nous y parvenions suffisamment tôt avant le déclenchement du processus si déclenchement il y a), la modélisation est difficile à remplacer.

En conclusion, le plus probable est que la circulation Nord Atlantique va un peu diminuer d'ici 2020, ce qui est cohérent avec les observations, mais un arrêt brutal semble extrêmement peu probable. Après, un troisième niveau de discussion est de savoir si les conséquences envisagées par le document du Pentagone sont plausibles si le Gulf Stream s'arrête. De ce point de vue, si un tel événement survenait en 2080 ou en 2120 plutôt qu'en 2020, nous aurions probablement droit à un chamboulement planétaire de très grande ampleur, avec une mortalité massive à la clé.

Incidemment, l'élément intéressant de ce rapport est surtout que, émanant d'une administration que Bush respecte énormément, il invite un président qui s'est souvent déclaré sceptique sur le changement climatique à considérer ce processus comme une menace de premier plan pour la sécurité intérieure des USA !

Le ralentissement des courants marins convectifs pourrait avoir une deuxième conséquence désagréable : comme ce sont eux qui ramènent des profondeurs les sels minéraux indispensables à la croissance du plancton végétal (que l'on appelle le phytoplancton), qui démarre la chaîne alimentaire marine, et que ce sont aussi ces courants qui amènent l'oxygène dans les fonds des océans, où ils permettent la vie, leur ralentissement pourrait affaiblir toute la vie marine en général, laquelle n'a pas nécessairement besoin de cette contribution additionnelle de notre part !



partir de 23 modèles différents. Sans avoir eu besoin de changer le climat, nous avons divisé la biomasse marine par 10 en un siècle. Pas mal....

Source : Science, 1999

En savoir plus sur les "surprises" : [la page du site Edusol](#)

Que risquent les écosystèmes ?

dernière version : novembre 2006

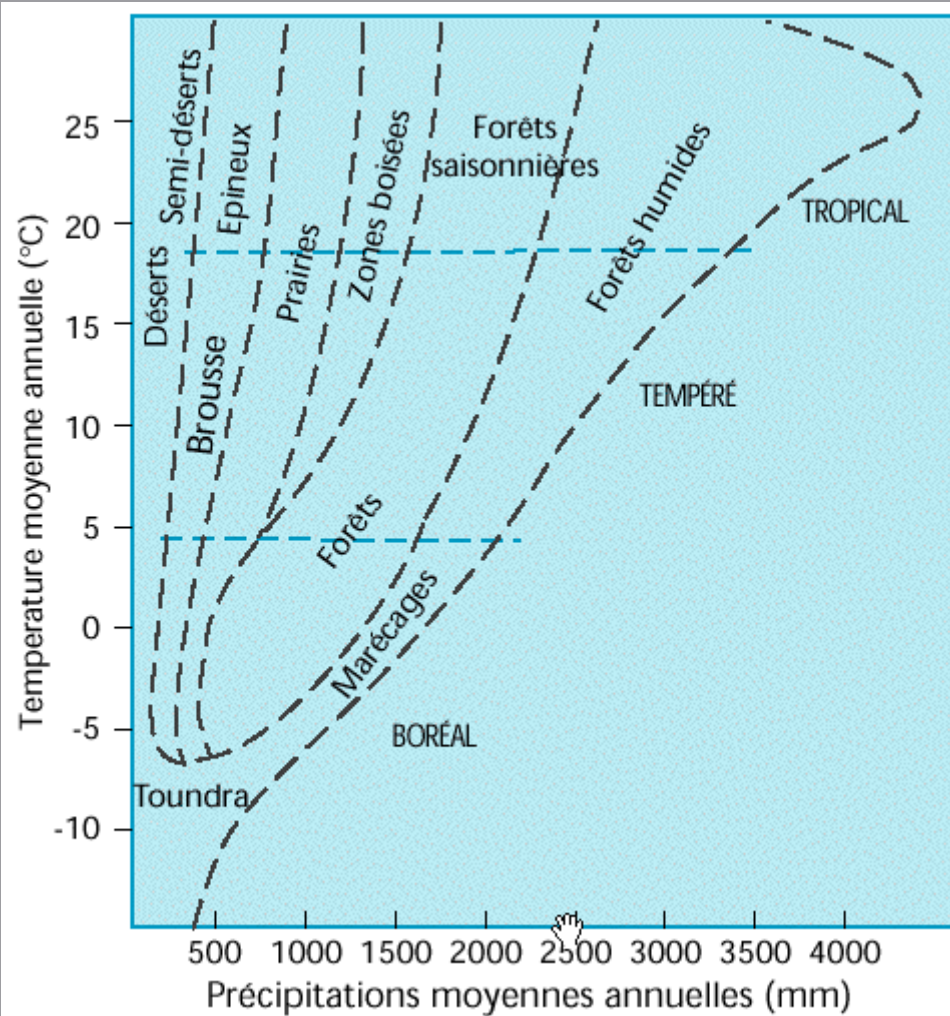
site web de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

C'est une évidence que l'immense majorité des espèces végétales ne sont pas adaptées à toutes les conditions climatiques de la planète : un palmier en Norvège ou un chêne au Sahel ne se plairont pas beaucoup. Enoncer cette évidence, cela revient à dire que les espèces végétales - et animales - qui composent les écosystèmes sont adaptées au climat local. Elles peuvent souvent s'adapter à des conditions voisines (par exemple les côtes bretonnes - et même la côte Sud de l'Angleterre - comportent facilement de la végétation tropicale, qui supporte très bien des températures plus basses que celles de ses lieux d'origine pourvu qu'il ne gèle pas - ou pas trop fort), mais pas trop.

Dès lors que les conditions climatiques globales vont changer, les conditions climatiques locales vont faire de même. Si le changement était homogène, il serait "assez" facile de savoir comment cela se traduit pour chaque région : la planète se réchauffe de 3°C, et hop, c'est pareil en janvier et en août, à Paris et à Tombouctou, à midi et à 3 heures du matin.

Manque de chance, le [réchauffement ne sera pas homogène du tout](#) : savoir comment va exactement évoluer la température en Beauce ou dans le Massif Central si la moyenne planétaire monte de 3°C est un exercice qui reste très délicat, parce que la variabilité locale est bien importante que la variabilité globale. En outre, un changement de climat, c'est aussi un changement du cycle de l'eau, et enfin n'oublions pas que, dans cette affaire, la quantité de CO₂ dans l'air va monter, ce qui est généralement un facteur de croissance des végétaux (plus de CO₂, c'est plus à manger pour les plantes, miam miam !).

Avant même de parler de CO₂ augmenté dans l'air, il est intéressant de noter que, pour l'essentiel des écosystèmes "sauvages", les précipitations sont bien plus déterminantes que les températures moyennes.

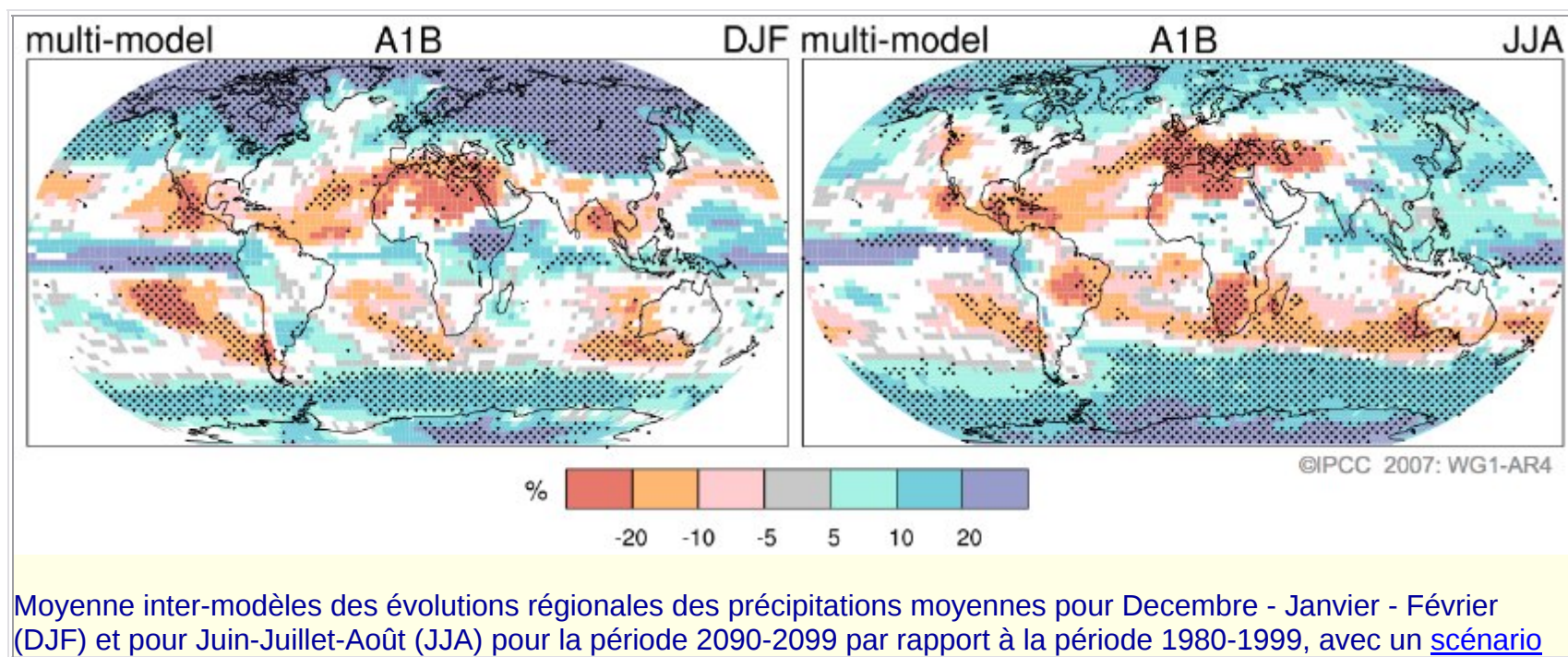


Types de végétation possibles en fonction des précipitations annuelles moyennes et des températures moyennes.

Source : [GIEC](#), 1996

On voit facilement sur ce graphique que la quantité d'eau disponible est bien plus déterminante que la température moyenne pour les végétaux : si les précipitations se modifient (on se déplace alors sur l'axe horizontal), on passe rapidement d'un type de végétation à un autre. Dit autrement, cela signifie que des variations de température ne sont pas nécessairement dramatiques pour la végétation, du moins tant que l'on reste dans les limites de quelques degrés, alors que des variations de précipitations peuvent très vite l'être.

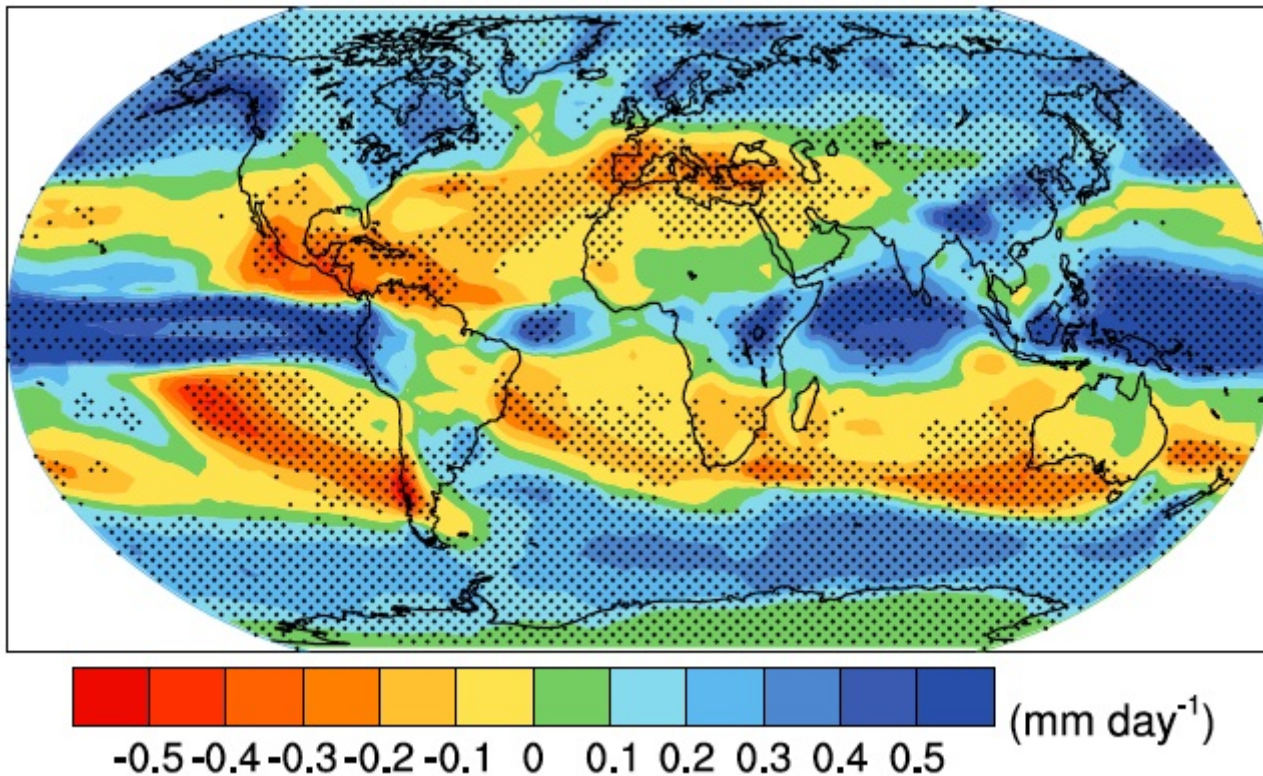
Fort bien, se dira le lecteur, il n'y a qu'à regarder les prévisions régionales de précipitations, et nous saurons comment vont évoluer les écosystèmes ! Hélas, autant les évolutions régionales de température prédites sont globalement assez similaires d'un [modèle](#) à l'autre, autant les évolutions régionales de précipitations sont bien plus dépendantes du modèle, ce qui revient à dire que les points de consensus sont plus rares (figure ci-dessous).



d'émission qui est le A1B (en gros les émissions doublent au cours du 21^è siècle).

Les zones blanches correspondent à une absence de concordance significative entre modèles (impossible de dégager une tendance) et les zones avec pointillés correspondent à l'inverse à un consensus presque parfait (plus de 90% des modèles concordent sur le signe de l'évolution). Par exemple l'assèchement du pourtour du bassin méditerranéen pour l'été (chez nous) correspond à une tendance observée dans plus de 90% des simulations.

Il est aisé de constater que les évolutions peuvent beaucoup varier selon la saison. On notera aussi une excellente nouvelle pour notre pays : parmi les zones qui s'assèchent le plus l'été on trouve... la France, et cela reste valable en moyenne annuelle (ci-dessous).



Moyenne inter-modèles des évolutions régionales des précipitations sur l'ensemble de l'année, en mm/jour de différence entre la période 2080-2099 et la période 1980-1999, avec un scénario d'émission qui est le A1B (en gros les émissions doublent au cours du 21^e siècle). Tout le pourtour du bassin méditerranéen va globalement s'assécher, de même que l'Amérique Centrale, le Sud du Chili, et le sud de l'Australie. Les régions surchargées avec des pointillés noir correspondent aux régions où 80% des simulations sont concordantes en signe et en amplitude. NB : Une variation de 0,5 mm/jour signifie environ 150 mm d'eau en plus ou en moins sur l'année, soit entre le quart et le cinquième de ce qui tombe sur l'essentiel des régions européennes et méditerranéennes.

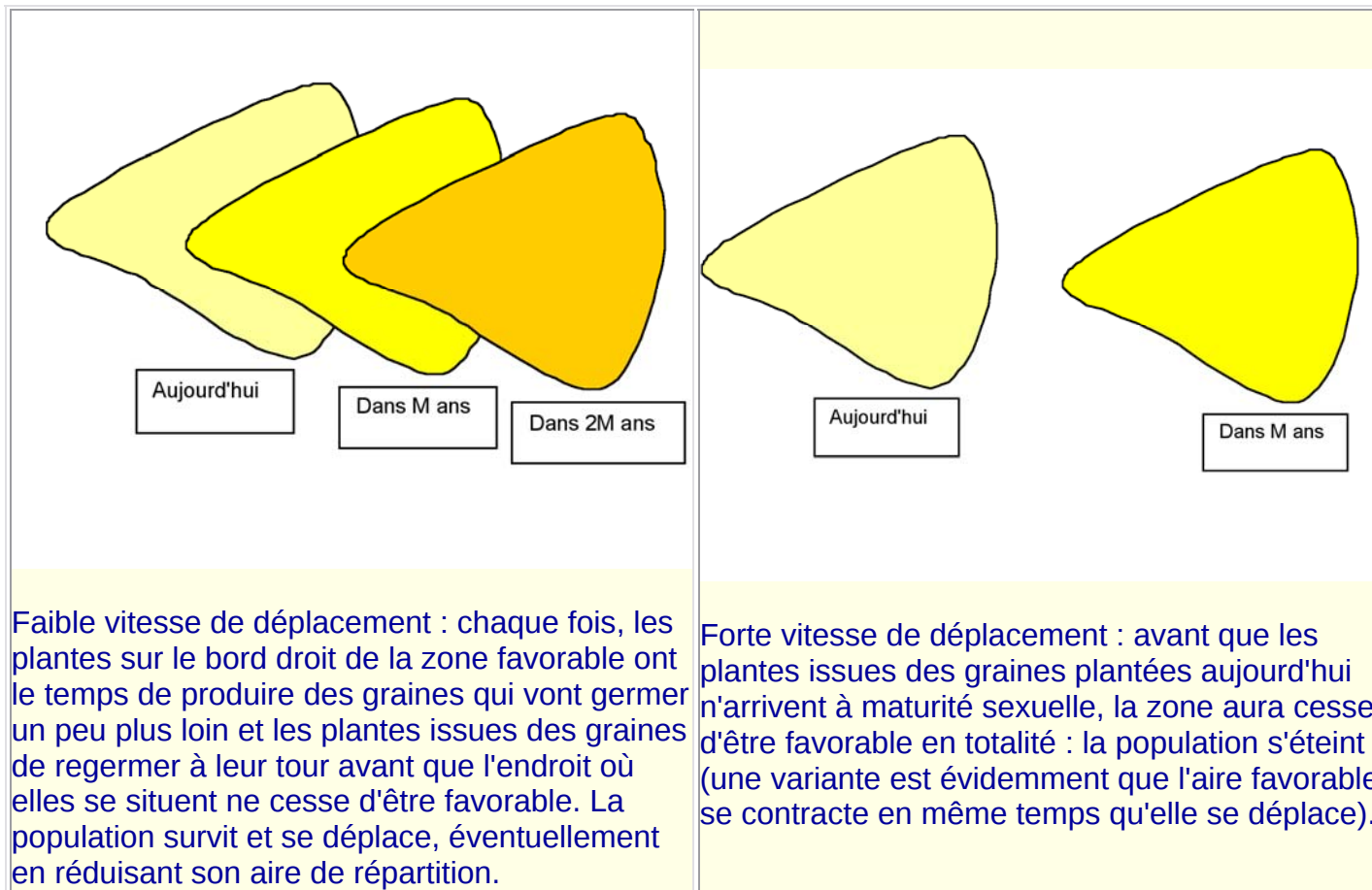
Source : [GIEC](#), 4th assessment report (working group 1), 2007

Il faudra donc se contenter d'un examen "générique" des conséquences possibles du changement climatique sur la végétation, encore compliquées par le fait que l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂ est par contre plutôt une bonne affaire pour les plantes (mais il n'est bien sûr pas possible de dissocier les éventuels effets bénéfiques du CO₂ sur le plan biologique des éventuels effets maléfiques du changement climatique provoqué par ce même CO₂ !). Qu'est-ce que le changement climatique peut provoquer pour les plantes, et, en conséquence, pour les écosystèmes ?

➤ il peut provoquer des déplacements d'aires favorables trop vite pour que la régénération naturelle puisse suivre.

► Un déplacement d'aire favorable signifie que la région où il fait "bon vivre" pour un végétal voit ses contours se déplacer. Si elle se déplace lentement ce n'est pas très grave : la population de végétaux se déplace aussi et survit ; c'est par exemple ce qui arrive lors des transitions entre ères glaciaires et ères interglaciaires. Mais si l'aire favorable se déplace trop brutalement, la population disparaît car elle n'a pas le temps de se reproduire et de migrer avant que les conditions ne cessent d'être favorables.

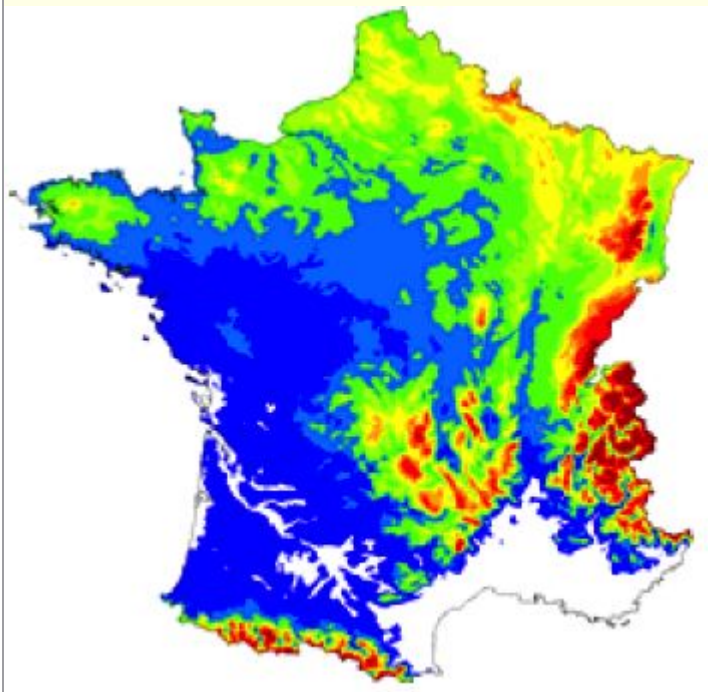
On a représenté ci-dessous le déplacement d'une zone favorable, en dessinant, dans deux cas de figure, l'endroit où elle se tient actuellement, l'endroit où elle se tient au moment où les graines semées aujourd'hui ont produit des plantes sexuellement matures (dans M années), et au moment où les plantes issues elles-mêmes des graines germées sont devenues sexuellement matures (dans 2M années).



- Selon les espèces, les "vitesses de migration" maximales varient de 4 à 200 km par siècle. La vitesse limite de déplacement est d'autant plus faible que la plante vient à maturité tardivement et que...ses graines peu mobiles (donc ne peuvent pas aller naturellement très en dehors de la zone favorable du moment) ; les chênes ([maturité à 50 ans](#), graines lourdes et peu d'animaux colporteurs) sont un exemple typique d'espèce à vitesse de migration lente.

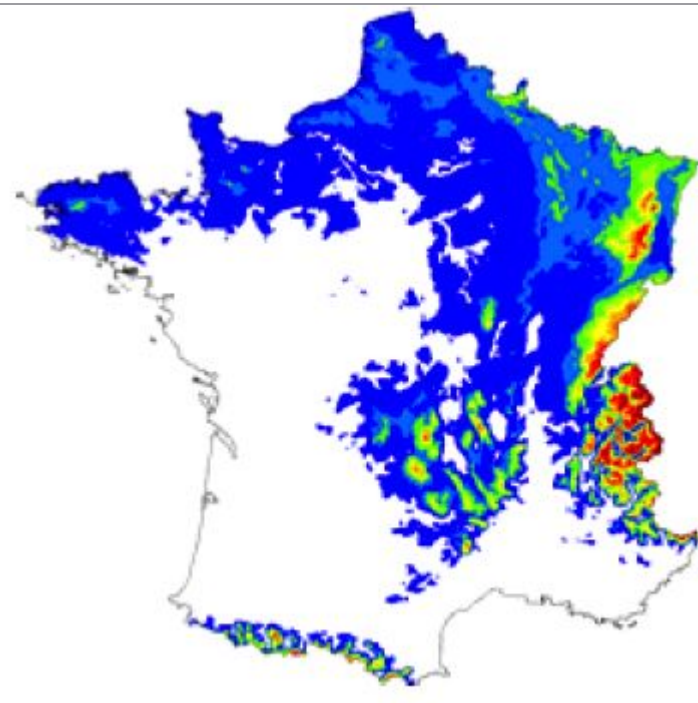
► Or selon le [GIEC](#) un réchauffement de 3° C équivaut, pour les zones tempérées, à un déplacement d'aire favorable vers le pôle de 500 km environ. 3° C en un siècle - [évolution médiane de la fourchette de 1 à 6°C actuellement prédite](#) - engendre donc une vitesse de déplacement bien supérieure aux 200 km maximaux indiqués plus haut. En outre il est probable que les continents, qui n'ont pas la capacité d'amortissement thermique des océans, connaîtront des augmentations de température plus rapides encore. De nombreuses espèces naturelles - dont les arbres, et les écosystèmes forestiers attachés - pourraient donc dépérir en cas de modification climatique brutale. Un exemple est donné ci-dessous pour ce qui s'appelle "l'aire de répartition" de 2 essences communes en France (hêtre et épicéa).

Une "aire de répartition" ne dit pas où se trouvent les arbres, mais où ils peuvent se trouver. Si on les arrache, si un ravageur passe par là, etc., ils peuvent s'y trouver mais ne s'y trouvent pas !



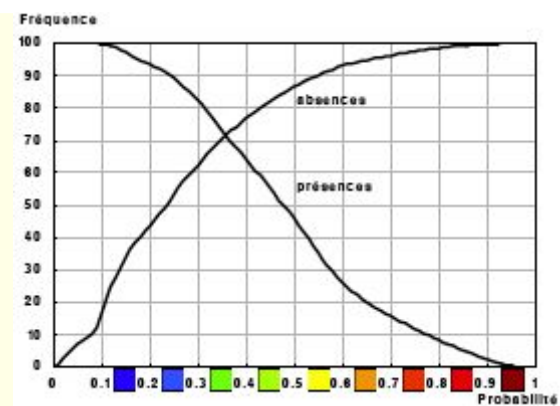
Aire potentielle de répartition du hêtre en 2000 (la signification des couleurs se trouve ci-dessous).

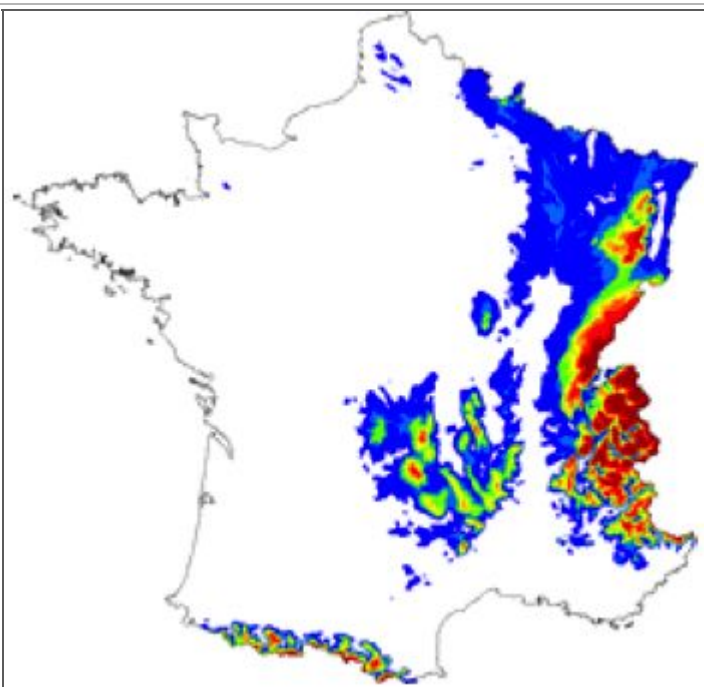
Source : Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises, Badeau et al., juin 2004 (téléchargeable sur le site de l'[INRA de Nancy](#)).



Aire de répartition du hêtre simulée pour 2100, avec un scénario laissant les émissions de CO₂ au niveau actuel tout au long du 21^e siècle. De nombreuses zones du pays auraient des conditions climatiques qui sortent de ce que cet arbre peut tolérer (et donc les hêtres présents dans ces régions mourront), et bien sûr ces simulations ne sont pas des prévisions : impossible de prendre en compte l'effet potentiel des ravageurs ou, s'il existe, de la compétition entre espèces (par exemple le développement d'une espèce "couvrante", gênant l'accès à la lumière, peut tuer une autre espèce qui serait adaptée sinon).

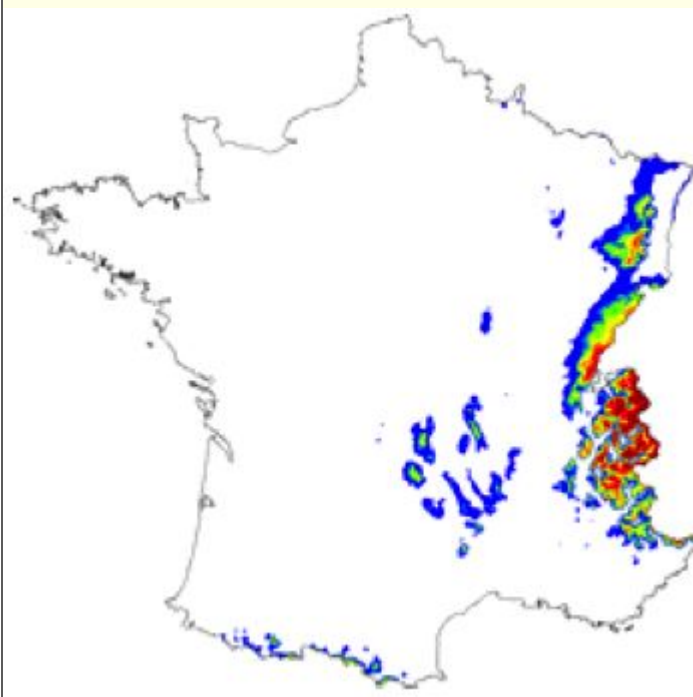
Code couleur utilisé en fonction de la probabilité de présence du hêtre en un endroit donné.





Aire potentielle de répartition de l'épicéa en 2000 (la signification des couleurs se trouve ci-dessous).

Source : Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises, Badeau et al., juin 2004 (téléchargable sur le site de [l'INRA de Nancy](#))



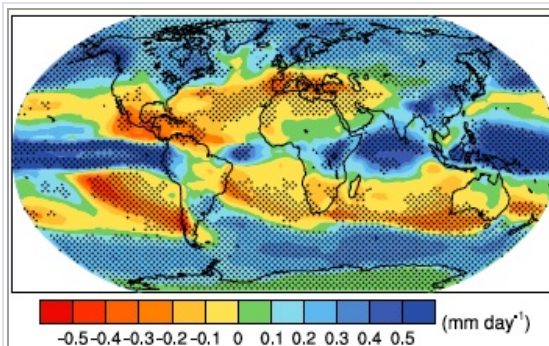
Aire de répartition de l'épicéa simulée pour 2100, avec un [scénario](#) laissant les émissions de CO₂ au niveau actuel tout au long du 21^è siècle. Les mêmes réserves que pour le hêtre s'appliquent sur la signification du résultat.

Code couleur utilisé en fonction de la probabilité de présence de l'épicéa à un endroit donné.

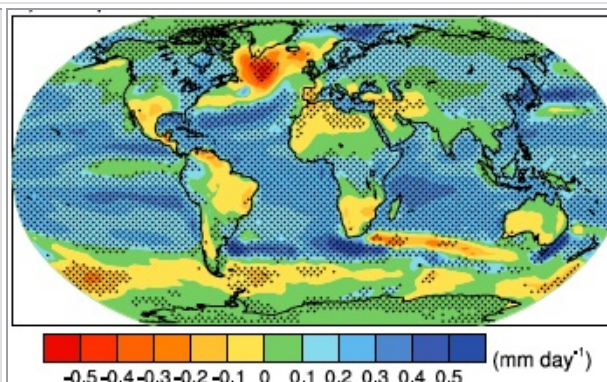


➤ Si l'aire favorable se déplace, cela signifie que l'aire anciennement favorable ne l'est plus. Que pourrait-il bien lui arriver ?

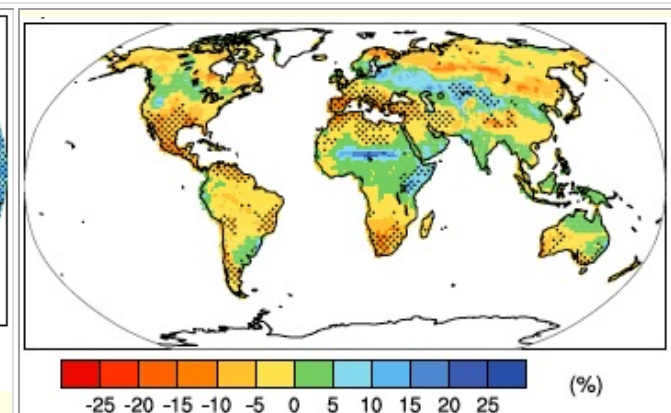
► le temps peut y devenir trop sec (il y a 8.000 ans une partie du Sahara était un endroit couvert d'une abondante végétation, ce qui montre que la possibilité d'un assèchement massif n'est pas impossible en soi), et cela peut résulter soit d'un déficit de précipitations, soit d'une évaporation accrue, soit d'un sol qui s'assèche à cause d'une concentration des précipitations sur des épisodes plus brefs et plus intenses)



Moyenne inter-modèles des évolutions régionales des précipitations



Moyenne inter-modèles des évolutions



annuelles, en mm/jour de différence entre la période 2080-2099 et la période 1980-1999, avec un <u>scénario d'émission</u> qui est le A1B (en gros les émissions doublent au cours du 21^e siècle). Les régions avec des pointillés noir correspondent à 80% des simulations qui concordent en signe et en amplitude. NB : Une variation de 0,5 mm/jour signifie environ 150 mm d'eau en plus ou en moins sur l'année, soit entre le quart et le cinquième de ce qui tombe sur l'essentiel des régions européennes et méditerranéennes. Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation , 2007	régionales de l'évaporation annuelle, en équivalent mm/jour de différence entre la période 2080-2099 et la période 1980-1999, avec un <u>scénario d'émission</u> qui est le A1B (en gros les émissions doublent au cours du 21^e siècle). Attention ! Les zones vertes et bleues correspondent à une augmentation de l'évaporation (et donc à un assèchement toutes choses égales par ailleurs). Les régions avec des pointillés noir correspondent à 80% des simulations qui concordent en signe et en amplitude. NB : Une variation de 0,5 mm/jour signifie environ 150 mm d'eau qui s'évapore en plus ou en moins sur l'année. Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation , 2007	Moyenne inter-modèles de l'évolution de l'humidité moyenne des sols entre la période 2080-2099 et la période 1980-1999, avec un <u>scénario d'émission</u> qui est le A1B (en gros les émissions doublent au cours du 21^e siècle). Les régions avec des pointillés noir correspondent à 80% des simulations qui concordent en signe et en amplitude. Un sol plus sec est évidemment moins hospitalier pour les espèces en place ; notez que même des endroits où les précipitations augmentent (ex : une partie de l'Europe du Nord, le Canada, la Sibérie) peuvent voir les sols s'assécher. Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation , 2007
--	--	---

- il peut y devenir trop chaud : sous nos latitudes, la vernalisation (exposition au froid pendant l'hiver) est indispensable à certaines plantes pour pouvoir produire des fruits (et des graines, surtout !), et par ailleurs l'hiver est aussi fort utile à beaucoup de végétaux des mêmes latitudes pour...se protéger des insectes ravageurs, tués par le froid, et qui prolifèrent sinon.
- le temps peut devenir trop riche en phénomènes extrêmes, peuvent détruire physiquement les végétaux, dégrader le sol, ou amener des éléments qui empêchent le développement de la végétation...
- Un changement climatique peut augmenter la compétition d'autres espèces : par exemple, les conditions peuvent devenir particulièrement favorables pour des micro-organismes provoquant des maladies (champignons, microbes...), et pour des ravageurs du monde animal, notamment les insectes (des nuages de criquets dans la Beauce, ça vous dirait ?).

➤ Un changement climatique peut provoquer des conditions favorables à une agression humaine, notamment l'incendie qui est assez inéluctable en cas de sécheresse (n'oublions pas que la majeure partie de la Terre est peuplée d'hommes !),

➤ Un changement climatique peut plus généralement déstabiliser l'équilibre d'un écosystème ce qui peut appauvrir sa biodiversité voire, dans les cas les plus défavorables, le tuer. Pendant les ères glaciaires, les écosystèmes que nous connaissons aujourd'hui étaient absents des moyennes latitudes. Il est difficile de dire ce qui subsisterait des écosystèmes actuels sur une planète qui "prendrait" 5 ou 6 °C en un siècle, mais dans bien des régions du monde cela risque de signifier un gros choc.

Une étude publiée par [Nature](#) en janvier 2004 suggère qu'un réchauffement de 1,8 à 2 °C entre 1990 et 2050 pourrait conduire à la suppression d'un quart des espèces vivantes en 2050 par rapport à aujourd'hui. Ce résultat préliminaire est bien sûr à prendre prudemment, puisqu'il s'agit d'une simulation unique, non répétée, mais elle est clairement indicative d'un risque important.

La vulnérabilité de l'agriculture

L'agriculture est un cas particulier de végétation, donc tout ce qui est dit ci-dessus s'applique (y compris les criquets !), mais dans ce cas précis l'homme peut atténuer certains désordres climatiques (on peut remédier partiellement à la sécheresse par l'irrigation, du moins tant qu'il pleut pas trop loin de l'endroit à irriguer, au froid par la culture sous serre, etc).

Il faut y rajouter une autre particularité : pour la majorité des cultures l'objet d'intérêt n'est pas la plante entière, mais une de ses parties seulement : les fruits ou graines (céréales, fruits, et même les tomates ou les aubergines !), les feuilles (choux, salades...), la tige (cane à sucre, ou... arbres), la racine (betteraves, carottes...), le tubercule (pommes de terre), la fleur (choux-fleur, artichauts...), etc. Il y a donc deux questions qui se posent :

➤ comment la plante entière réagit à la variation du climat,

➤ comment cette variation se répartit entre tige, feuilles, fruits, racines, et cette répartition peut amener un bilan global défavorable alors que la photosynthèse a augmenté. Les feuilles peuvent par exemple croître au détriment des fruits.

Enfin il faut tenir compte de [l'augmentation du CO₂ dans l'air](#), et si nous faisons le panorama de tout cela, c'est assez complexe, comme le schéma ci-dessous le montre bien !

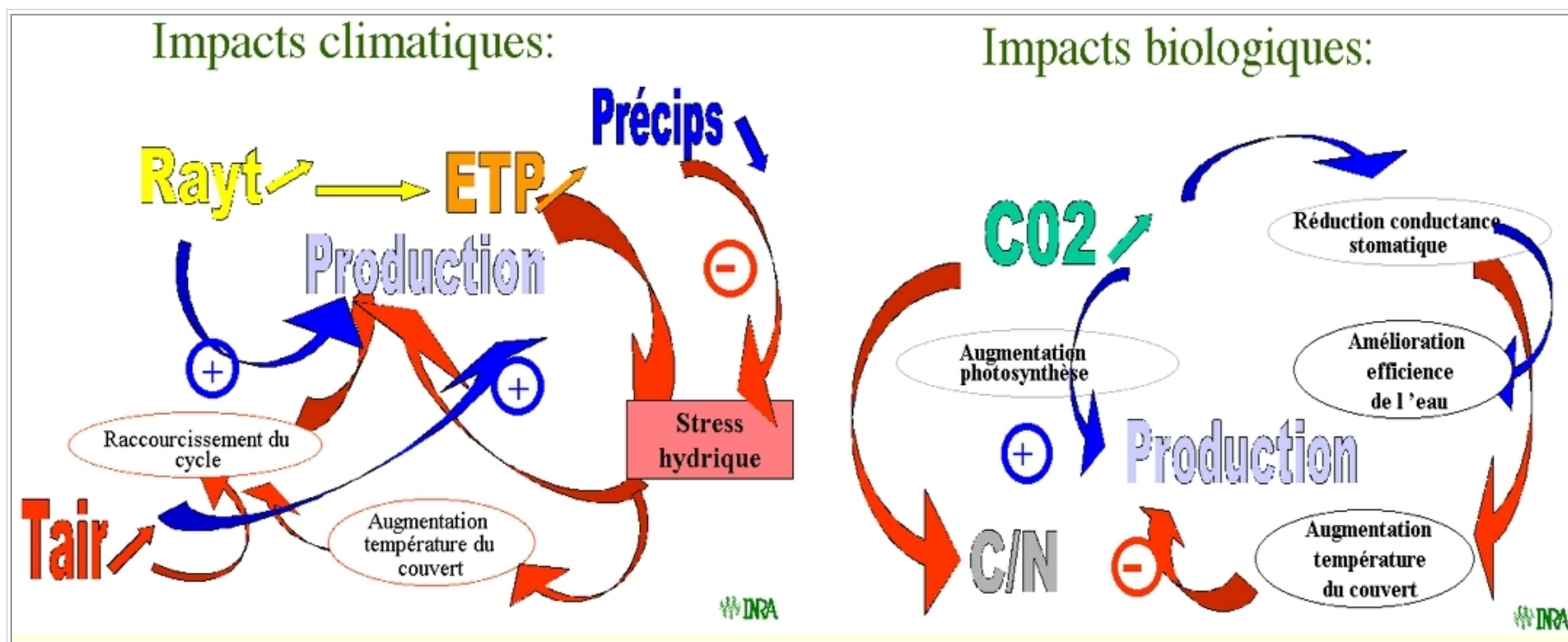
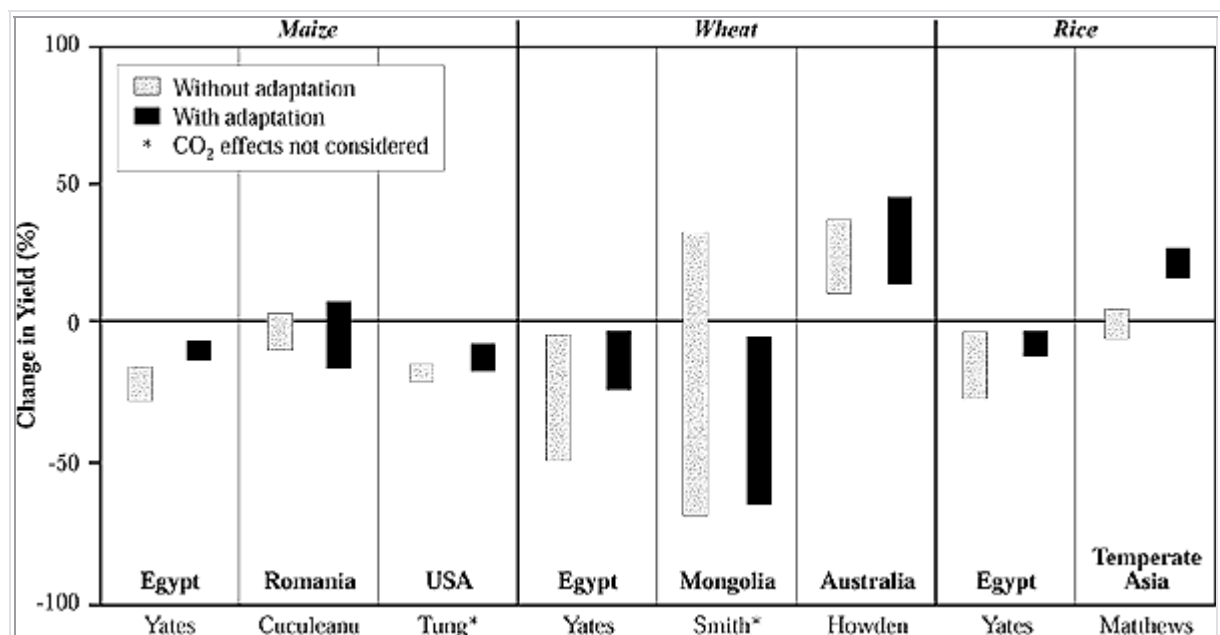


Schéma synthétique des impacts sur la production agricole d'un climat et d'une atmosphère modifiés. A gauche, conséquences de la modification des variables purement climatiques (augmentation des températures de l'air, du rayonnement solaire, diminution des précipitations ; ETP signifie évapotranspiration, soit la perte d'eau destinée à refroidir la plante par évaporation). A droite, conséquences biologiques de l'augmentation du CO₂.

Les flèches rouges représentent les effets négatifs sur la production ou supposés comme tels, et les flèches bleues les effets positifs.

Source : [Delecolle et. al, La Jaune et La Rouge, mai 2000](#)

Sur la base de ce genre de schéma fonctionnel, les agronomes ont bien évidemment essayé d'avoir une idée de ce qui pourrait se passer dans un climat modifié, et cela donne par exemple ce qui figure ci-dessous.



Pourcentage de gain - ou de pertes - en 2100 par rapport à maintenant, pour des cultures diverses, des scénarios divers, et des zones géographiques diverses. "With adaptation" signifie que les dates de récolte et de semis sont adaptées au mieux au nouveau climat, "Without adaptation" que ce n'est pas le cas. On note une très large dispersion des résultats : selon le [scénario d'émission de gaz à effet de serre](#) retenu, les récoltes de maïs en Roumanie perdent plus de 10% ou gagnent 5%.

Source : [Troisième rapport d'évaluation du GIEC, tome 2, "Impacts, Adaptation and](#)

Vulnerability"

Mais un certain nombre de facteurs ne sont pas - ou très mal - pris en compte dans ces simulations :

- l'apparition possible de nouveaux ravageurs (insectes, champignons, virus...), ou leur prolifération subite, ce qui est probablement le risque majeur,
- la compétition entre espèces, et notamment celle avec les adventices (ce que l'on appelle les "mauvaises herbes" en français courant),
- la répartition des modifications entre les diverses parties de la plante (par exemple on peut avoir moins de graines, ou de moins bonne qualité nutritive, même si la plante dans son ensemble ne souffre pas trop).
- l'augmentation possible de la [variabilité du climat](#)
- et bien sûr d'autres éléments perturbateurs qui s'appliquent aux mêmes échelles de temps (érosion et diminution de la fertilité des sols, diminution des "moyens énergétiques" à notre disposition pour lutter contre l'adversité, dégâts volontaires en cas de conflits, etc).

Ces résultats sont donc à prendre à titre indicatif, car là comme ailleurs les principaux facteurs de risque résident probablement dans ce qu'il n'est pas possible d'étudier aujourd'hui !

Si nous ajoutons à cela que l'agriculture est souvent devenue très spécialisée dans nombre de pays (un nombre très limité d'espèce assure une très large fraction de la production), et donc qu'une forte chute des rendements sur une espèce particulière aurait des effets importants, il faut en conclure que l'agriculture serait surtout particulièrement vulnérable en cas de forte [variabilité](#) du climat, ou d'apparition de ravageurs particulièrement bien adaptés à une espèce donnée.

La vulnérabilité des écosystèmes d'eau douce... ou salée

Comme on l'a vu plus haut, le changement climatique ne se bornera probablement pas à une évolution des températures : les précipitations vont aussi se modifier. L'ensemble des deux peut affecter les écosystèmes aquatiques de multiples manières :

- Les écosystèmes aquatiques et les populations piscicoles pourraient souffrir d'une alternance de fortes précipitations et de périodes sèches, ou d'une augmentation de la température de l'eau,
- Les micro-organismes pathogènes existent aussi dans l'eau,
- Dans l'océan, le réchauffement va modifier les zones de distribution des espèces mobiles, et handicaper plus ou moins fortement les espèces qui ne le sont pas ou peu (dont les coraux)...

En guise de conclusion...

Il semble assez peu probable, compte tenu de ce que représentent quelques degrés de différence de la température moyenne à la surface de la terre, que 90% des écosystèmes passeraient "à travers" sans dommages. Une étude parue dans Nature il y a 1 ou 2 ans chiffrait à quelques dizaines de % le "taux de décès" des espèces actuellement présentes à la surface de la terre en cas de réchauffement de 3 °C, mais il s'agit clairement d'une indication qui a du mal à être rendue plus précise. Dissserter longuement sur la localisation des risques et leur nature, passées les quelques généralités ci-dessus, est encore une affaire risquée !

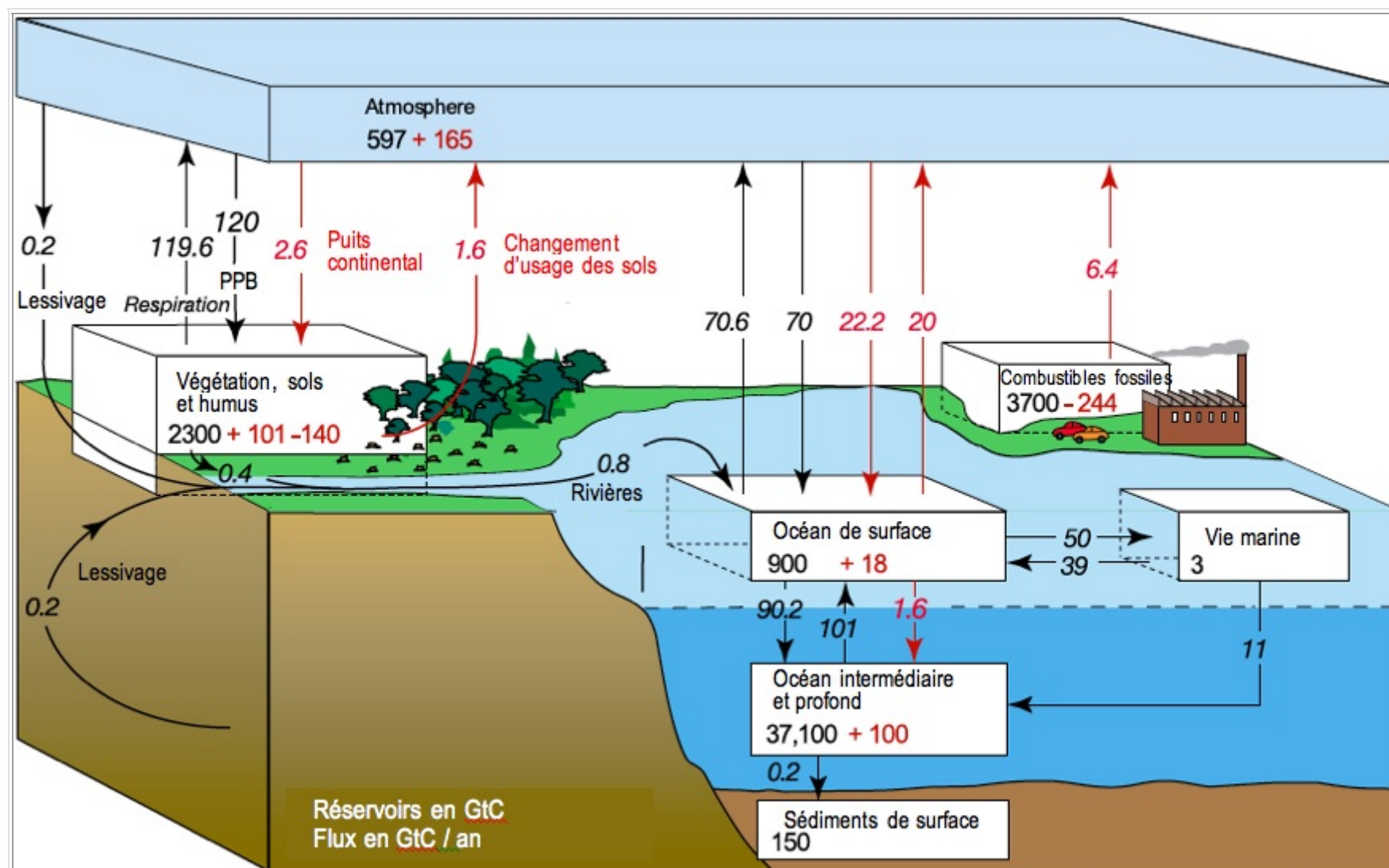
Pour en savoir plus (pour lecteur un peu averti) : télécharger, au format PDF, le [résumé des décideurs](#) (en Français) ou le rapport complet [du groupe 2 du GIEC](#)

Allons-nous transformer l'océan en un lac d'acide ?

dernière version : août 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Comme chacun le sait (peut-être !), l'homme met désormais des [quantités significatives de CO₂ dans l'atmosphère](#), qui s'inscrivent bien sûr dans un cycle naturel du carbone bien plus vaste, qui comporte notamment des échanges entre atmosphère et océan.



Représentation des stocks de carbone sur Terre susceptibles d'alimenter des échanges à l'échelle du siècle (ce

diagramme ne représente donc pas le carbone contenu dans le calcaire, qui est de très loin le stock le plus important de la planète), et des flux annuels, le tout en milliards de tonnes de carbone (notées GtC).

Les flux en noir représentent les échanges "naturels", autrement dit ceux qui étaient les seuls à exister avant le début de l'ère industrielle, et les valeurs en noir pour les stocks représentent l'état (reconstitué) de 1750, avant le début des activités industrielles. Les flux en rouge représentent l'effet des activités humaines (flux renforcés, diminués, ou créés), pour la moyenne de la décennie 1990, et les valeurs en rouge pour les stocks représentent la variation de 1750 à 1994.

Ce diagramme signifie par exemple :

- que les sédiments de surface (la fraction des sédiments océaniques qui est au contact de l'eau) contiennent 150 milliards de tonnes de carbone, montant inchangé depuis le début des activités industrielles,
- que l'océan intermédiaire et profond contenait 37.100 milliards de tonnes de carbone en 1750, montant qui a augmenté de 100 milliards de tonnes de carbone depuis le début des activités industrielles,
- que les écosystèmes terrestres contenaient 2.300 milliards de tonnes de carbone en 1750 (dans les plantes, les sols et l'humus), montant qui a augmenté de 101 milliards de tonnes de carbone depuis le début des activités industrielles au titre de l'accroissement de la productivité des plantes (plus de CO₂ et plus chaud = croissance plus rapide) mais qui a baissé de 140 milliards de tonnes de carbone sur la même durée à cause de la déforestation et éventuellement du déstockage d'une partie du carbone du sol,
- que l'atmosphère contenait 597 milliards de tonnes de carbone en 1750, montant qui a augmenté de 165 milliards de tonnes de carbone depuis le début des activités industrielles suite aux émissions de CO₂,
- que l'influence des activités humaines a conduit l'océan de surface à émettre 20 milliards de tonnes de carbone par an en plus de ce qu'il émettait en 1750 (flèche rouge vers le haut), essentiellement à cause de l'augmentation de sa température de surface (une eau océanique qui se réchauffe "dégaze" une partie du CO₂ dissous qu'elle contient), mais aussi à absorber 22,2 milliards de tonnes de carbone par an en plus de ce qu'il absorbait en 1750, en réponse à l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ (plus de CO₂ dans l'air "pousse" plus fort le CO₂ à se dissoudre dans l'eau de l'océan),

➤ que le stock de combustibles fossiles (tout agrégé : pétroles, gaz, charbons) valait environ 3700 milliards de tonnes de carbone en 1750 - avant que l'on ne commence à piocher dedans - et que fin 1994 nous avions "déstocké" (en fait brûlé, donc avec transfert à l'atmosphère) environ 244 milliards de tonnes de carbone (pour info entre 1994 et 2005 cette valeur a augmenté de 30%).

NB : les émissions de CO₂ d'origine fossile, qui sont à 6,5 milliards de tonnes de carbone - environ 24 milliards de tonnes de CO₂ - par an sur ce diagramme (soit la moyenne de la décennie 1990) sont désormais de presque 8 milliards de tonnes de carbone par an.

Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007.

Les échanges de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan de surface (environ 90 milliards de tonnes de carbone par an dans le schéma ci-dessus) ne doivent pas grand chose à la vie marine. En fait, en première approximation, ils ne lui doivent même rien du tout : si nous supprimons tous les poissons et toutes les baleines, cela aura assurément des inconvénients, mais pas celui de ralentir les échanges de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan de surface ! Ces échanges sont par contre très liés à l'existence d'une [circulation océanique globale](#), qui refroidit des masses d'eau à certains endroits de la planète (par exemple l'eau du Gulf Stream qui remonte vers le Pôle Nord), et réchauffe l'eau de surface à d'autres endroits (par exemple l'eau du courant du Labrador qui s'éloigne du Pôle Nord).

En effet, il se trouve que le CO₂ se dissout mieux dans l'eau froide que dans l'eau chaude (à la question "pourquoi", la meilleure réponse sera que c'est comme ça !), et du coup là où l'eau se refroidit, du CO₂ passe de l'air dans l'eau, alors que là où l'eau se réchauffe, du CO₂ passe de l'eau dans l'air. Cette caractéristique explique du reste pourquoi, dans un climat qui se réchauffe, le puits océanique aura tendance à s'affaiblir : l'eau qui se refroidit deviendra néanmoins un peu moins froide qu'avant, ce qui diminuera - en moyenne - l'absorption de CO₂ par l'eau qui se refroidit, alors que les émissions de CO₂ de la partie de l'océan qui se réchauffe, et qui se réchauffera encore plus (en moyenne aussi), auront tendance à augmenter.

Mais une fois "absorbé" par l'eau de mer, l'essentiel du CO₂ ne va pas rester sous cette forme, pas plus que le CO₂ "absorbé" par les écosystèmes continentaux ne reste sous cette forme, du reste. Une fois dissous dans l'eau de mer, une partie du CO₂ réagit avec l'eau pour former des ions hydrogénocarbonate (que l'on appelait autrefois bicarbonate), de formule HCO₃⁻, puis des ions carbonate, de formule CO₃⁻⁻.

Plus exactement, les réactions qui s'enchaînent sont les suivantes :

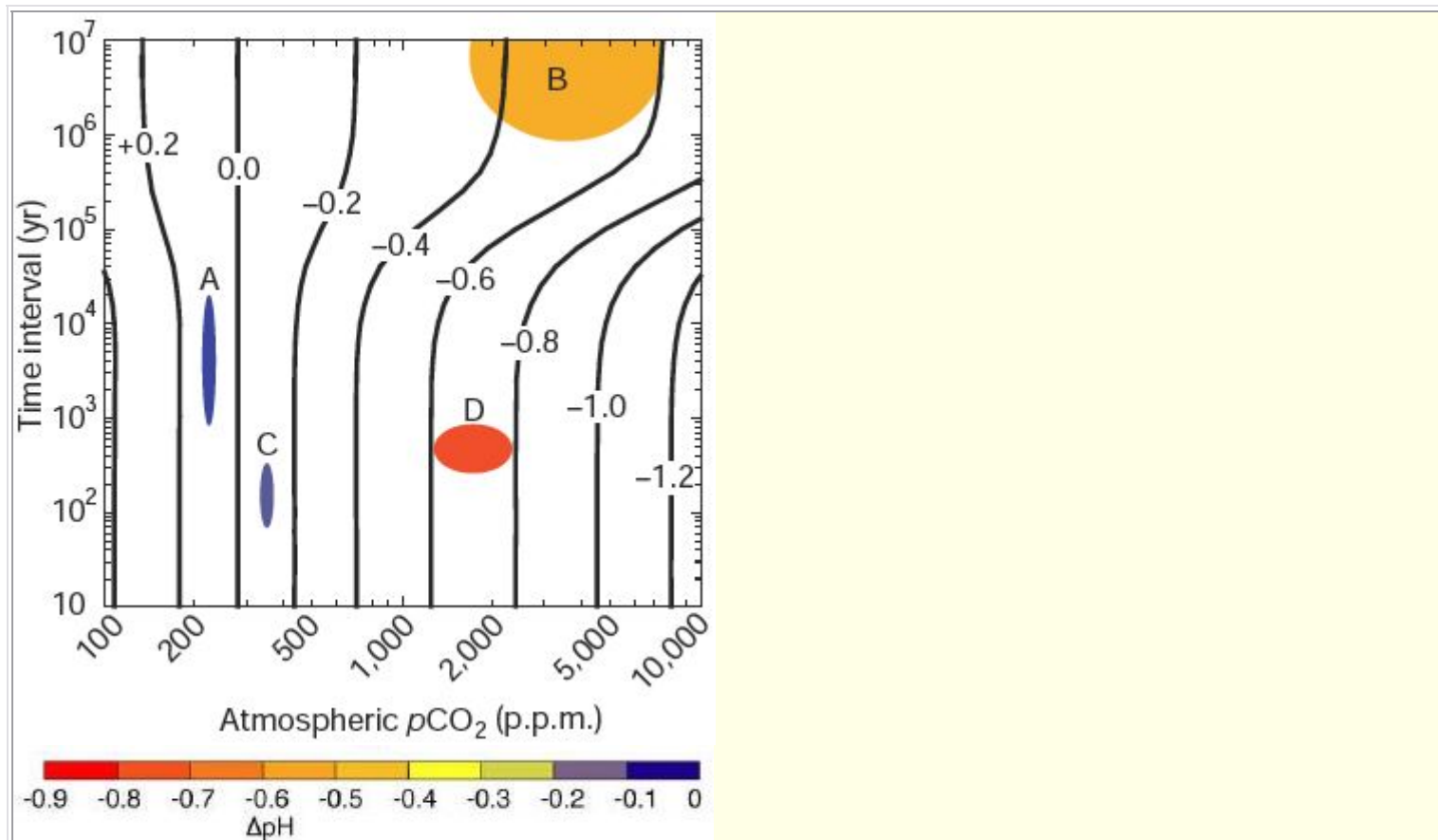


En fait, comme toute réaction chimique, celles-ci peuvent se produire dans un sens ou dans l'autre (cela dépend des conditions initiales, et pour des conditions données il y a bien sûr un sens qui est privilégié). On doit donc plutôt écrire :



Et de vieux souvenirs de chimie permettront peut être au lecteur de se rappeler qu'un composé qui "produit" des ions H^+ s'appelle.... un acide. Ce que dit la réaction ci-dessus, c'est donc que la dissolution du CO_2 dans l'eau de mer acidifie cette dernière. C'est du reste à cause de cette propriété que, en des temps anciens, le CO_2 s'appelait "acide carbonique" (c'est par exemple le terme employé par Arrhenius dans son [article prémonitoire sur le changement climatique qui allait découler de la civilisation industrielle](#)).

Ce que ne dit pas l'équilibre chimique ci-dessus, par contre, c'est que si il y a plus de CO_2 dans l'air, il va y en avoir plus dans l'eau. Il ne s'agit plus de chimie ici, mais de thermodynamique (aie aie aie ! voici des noms de plus en plus barbares !). Dit autrement, si l'air contient plus de CO_2 , ce dernier "passe" en plus grande quantité dans l'eau qui est à son contact, et une fois dans cette dernière il modifie l'acidité en formant des ions H^+ . De telles modifications d'acidité de l'océan ont donc eu lieu dans le passé, au gré des [variations naturelles de la concentration atmosphérique en \$\text{CO}_2\$](#) .



Variations comparées de pH de l'océan de surface au cours des ères passés (le code couleur figure sur l'échelle du bas). Les courbes noires "verticales" donnent la plage d'évolution du pH de l'océan de surface en fonction de la vitesse d'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'air. Ainsi une élévation de CO₂ de 2000 ppm se produisant en quelques millions d'années donne une diminution de pH limitée à 0,5, mais la même se produisant en quelques siècles acidifie l'océan de 0,8 unité de pH.

A - variation d'acidité de l'océan de surface entre les ères glaciaires et les ères interglaciaires (comme

maintenant) : $\text{pH} \pm 0,1$ en quelques milliers d'années

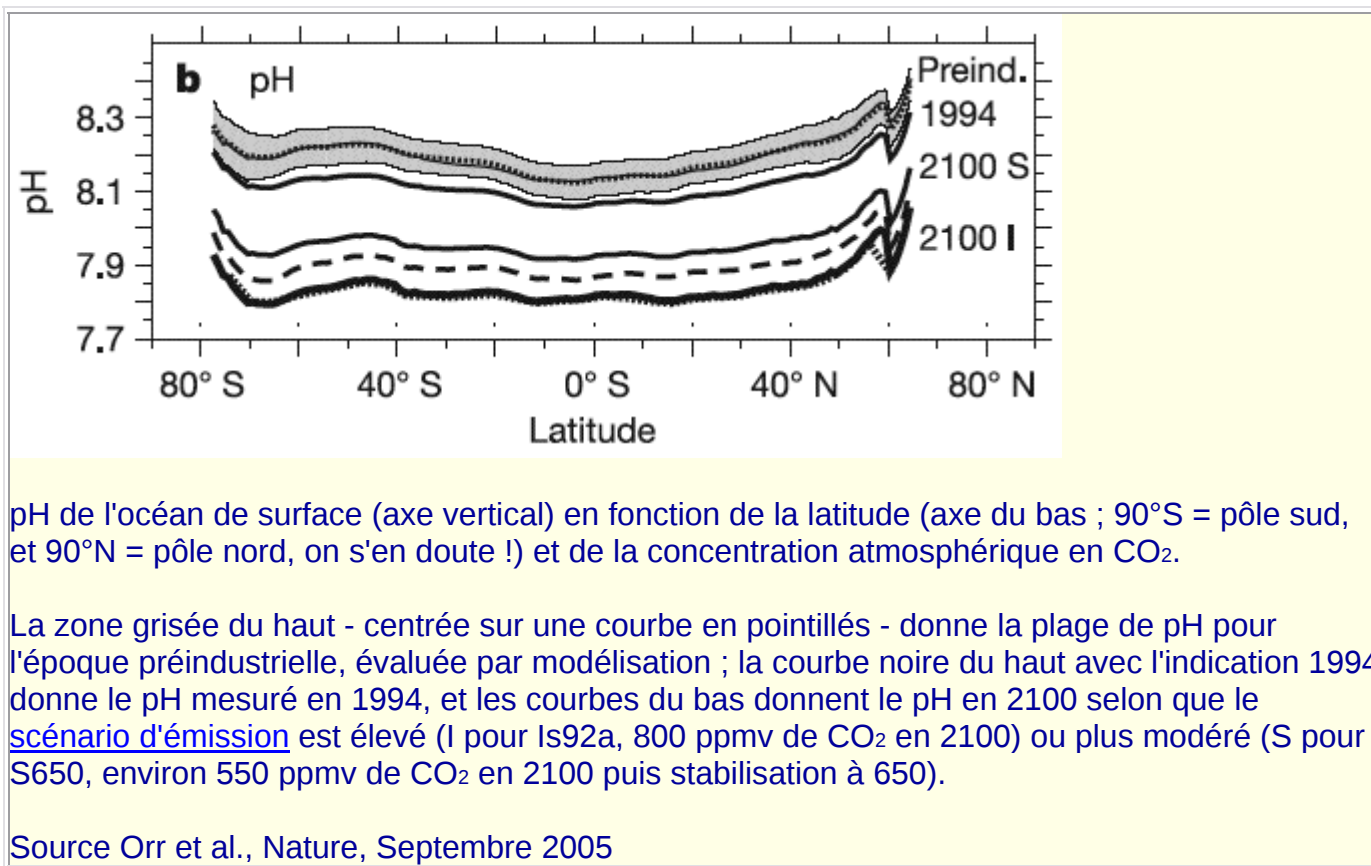
B - variation d'acidité de l'océan de surface au cours des 300 millions d'années : $\text{pH} \pm 0,5$

C - variation d'acidité de l'océan de surface au cours du dernier siècle sous l'effet des émissions de CO_2 déjà effectuées : $\text{pH} \pm 0,1$

D - variation possible du pH sous l'effet des émissions futures, en version "haute" : avec un gain de 1000 à 2000 ppm de CO_2 en quelques siècles, l'océan s'acidifierait de 0,5 unités de pH. Ce serait sans précédent en termes de diminution de pH depuis des millions (dizaines de millions ? centaines de millions ?) d'années, parce que la vitesse d'augmentation de CO_2 dans l'air serait inédite. Une telle évolution - en quelques siècles - n'est pas impossible si les puits continentaux de CO_2 se transforment en source.

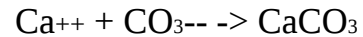
Source Caldeira & Wickett, Nature, 2003

De tout ce qui précède, on peut donc déduire que le fait d'augmenter la concentration en CO_2 dans l'air, ce que l'homme est incontestablement en train de faire, va non seulement avoir pour résultat de changer le climat, mais aussi d'acidifier un peu l'océan. En particulier, même avec des émissions que l'on considère fréquemment comme "modérées" (une concentration en CO_2 atteignant 550 parties par million en 2100), mais qui de fait ne le sont pas tant que cela, l'océan perdra 0,2 à 0,3 unités de pH en 2100 par rapport à maintenant.



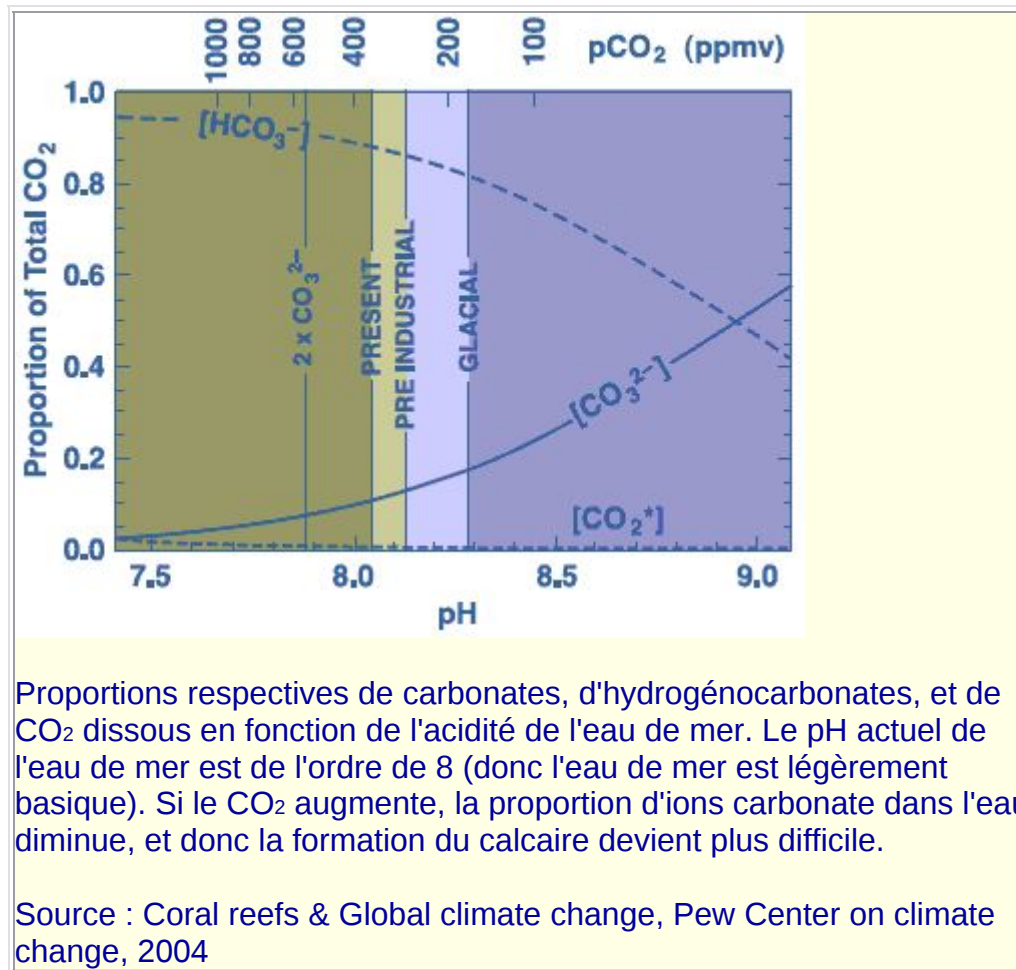
Et c'est grave, docteur ? Peut-être un peu, car l'acidification de l'eau aura des répercussions sur la vie marine, indépendamment de tout changement de climat. En effet, une partie significative des organismes marins a besoin de synthétiser du calcaire, soit pour faire une coquille (huitres, moules, bigorneaux, homards, et plus généralement tous les mollusques à coquille et tous les crustacés), soit un squelette (coraux, plancton). Or la réaction chimique de formation du calcaire est plus ou moins aisée en fonction de l'acidité de l'eau : plus l'eau est acide, et plus il est difficile à l'organisme de "fabriquer" du calcaire.

Peut-on revenir à quelques équations simples de chimie ? Alors voici ce qui se passe normalement chez "Mr. corail" ou "Mme huitre" quand il ou elle construit son squelette :



En d'autres termes, ces organismes utilisent des ions calcium dissous dans l'eau de mer et les font réagir avec les ions carbonate pour "produire" du carbonate de calcium, qui n'est que le nom barbare du ... calcaire.

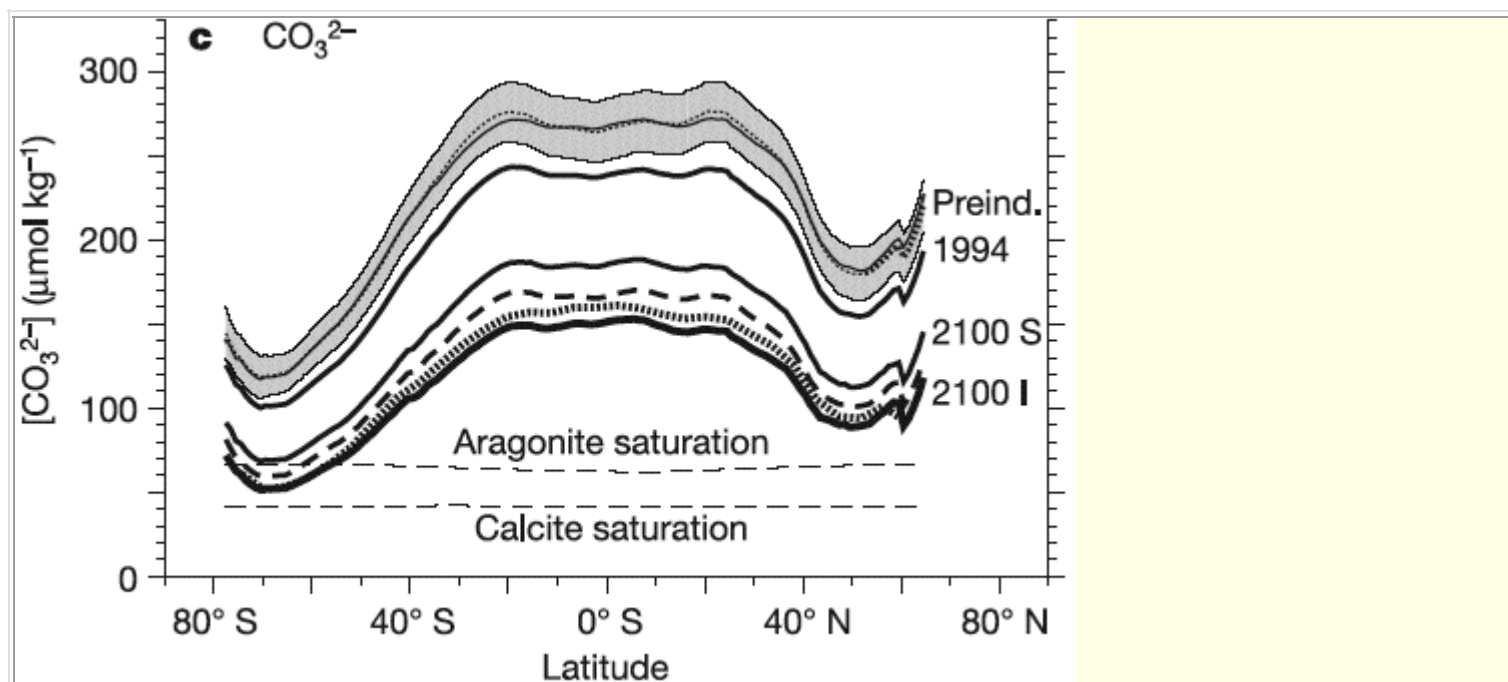
Nous avons vu plus haut que le CO_2 qui se dissout dans l'eau engendre des "successeurs" que sont l'hydrogénocarbonate (HCO_3^-) et le carbonate (CO_3^{--}), et qu'il s'établit une concentration d'équilibre entre les deux qui dépend des conditions du moment. Par exemple, sous les tropiques (là où sont les coraux), l'hydrogénocarbonate représente 85% du carbone dissous, et le carbonate 15%. Si l'acidité augmente, les proportions respectives de carbonate et hydrogénocarbonate vont changer, et plus précisément les carbonates diminuent (graphique ci-dessous).



Or ce sont uniquement les carbonates qui sont utilisés par les organismes marins qui ont besoin de se construire une coquille ou un squelette, et l'on peut assez raisonnablement penser qu'avec une proportion de carbonates en baisse, cette partie de la vie marine va connaître des temps plus difficiles. Ainsi, les expériences de laboratoire montrent qu'avec un doublement du CO_2 dans

l'air par rapport à maintenant, la calcification (c'est-à-dire la fabrication du calcaire par les organismes qui en font) ralentit de 10 à 40%, aussi bien pour le corail que pour les algues à coquille du phytoplancton.

Les simulations effectuées avec des [modèles](#) couplant océan et cycle du carbone montrent quant à elles que la concentration en ions carbonate pourrait être divisée par deux aux hautes latitudes (passant de 100 à 50 micromoles par litre d'eau de mer) d'ici 2100 (graphique ci-dessous).



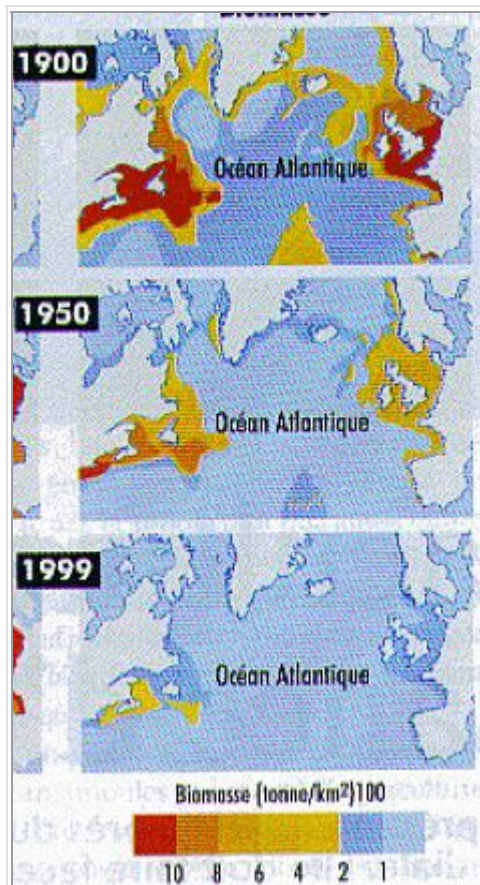
Concentration en ion carbonate (CO_3^{2-}) en fonction de la latitude selon l'époque. La courbe indiquée 1994 indique le profil de concentration en carbonate mesuré en 1994 ; la zone grisée donne la fourchette simulée pour l'ère préindustrielle, et enfin les concentrations simulées pour 2100 avec les scénarios S et I correspondent aux courbes indiquées avec ces lettres.

La courbe en tiretés représente le même profil de concentration en ion CO_3^{--} en 2300 avec le scénario S650, et la courbe en pointillés gras le résultat un peu différent du modèle IPSL pour le scénario IS92a.

Les courbes tiretées horizontales marquées "aragonite saturation" et "calcite saturation" donnent les concentrations minimales en ions carbonate qui sont nécessaires pour synthétiser de l'aragonite (une forme de calcaire) et de la calcite (une autre forme). Clairement, même avec un scénario "modéré" (S650), la concentration en carbonates dans les hautes latitudes deviendrait insuffisante en 2100 pour permettre la survie des micro-organismes ayant un squelette en aragonite.

Source Orr et al., Nature, Septembre 2005

Pour le moment l'acidité de l'océan ne pose pas encore de problème insurmontable, heureusement, mais si nous franchissons le seuil où nous invertissons la "pompe à carbone" terrestre (et non celle de l'océan), ce qui pourrait arriver dans quelques décennies en prolongation tendancielle, il n'est pas impossible qu'une importante diminution du pH se produise à long terme, rendant l'océan que connaîtraient nos successeurs assez différent de celui que nous connaissons.... et l'océan n'a pas besoin de cela !



Biomasse dans l'Atlantique Nord de 1900 à 2000, pour les poissons de niveau trophique $> 3,5$ (c'est-à-dire qui arrivent au moins en 3^e ou 4^e position dans la chaîne alimentaire), reconstituée à partir de 23 modèles de réseaux trophiques. Même sans changement climatique ou acidification de l'océan, la pression humaine s'est déjà exercée !

Source : La Recherche, juillet 2002

Allons nous être tous malades ?

dernière version : octobre 2004

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Si l'évolution climatique que nous avons enclenchée devait aboutir à l'[appauvrissement des écosystèmes](#), à la disparition de ressources naturelles (sols cultivables, [ressources halieutiques](#), etc), à des désertifications, à une division par trois de la production agricole, à une recrudescence de [phénomènes extrêmes](#), à des migrations, voire à des [guerres](#), il est évident qu'il y aurait des répercussions sur la santé, et que l'espérance de vie baisserait.

Le propos ici ne sera donc pas de spéculer sur tous les effets domino possibles, car la quantification des effets sanitaires indirects du changement climatique est un exercice qui restera longtemps - toujours ? - hautement spéculatif. En effet, la seule bonne manière de quantifier les effets sanitaires induits par une modification non directement toxique ou mortelle à court terme est de faire ce que l'on appelle une étude épidémiologique.

Qu'est-ce qu'une étude épidémiologique ?

Une étude épidémiologique est une étude statistique, menée sur un grand nombre de personnes, qui vise à savoir si il existe un effet discernable à moyen terme pour une cause donnée qui n'a pas d'effets immédiats, et si oui de l'estimer ; il en existe par exemple pour la pollution automobile, le tabac, ou encore l'exposition à telle ou telle substance supposée toxique (dont les radiations ionisantes, qui ne sont qu'un cas particulier du cas général mentionné ici).

Ces études sont les seuls moyens à la disposition de la médecine lorsque l'effet n'est pas certain. Elles portent généralement sur un très grand nombre (quelques milliers au moins) de gens qui ont été exposés à un agent supposé nuisible "à la longue", pour comparer leur évolution avec celle d'un groupe témoin, non exposé, mais similaire pour toutes ses autres caractéristiques (âge, sexe, profession, habitudes de vie...) au groupe exposé.

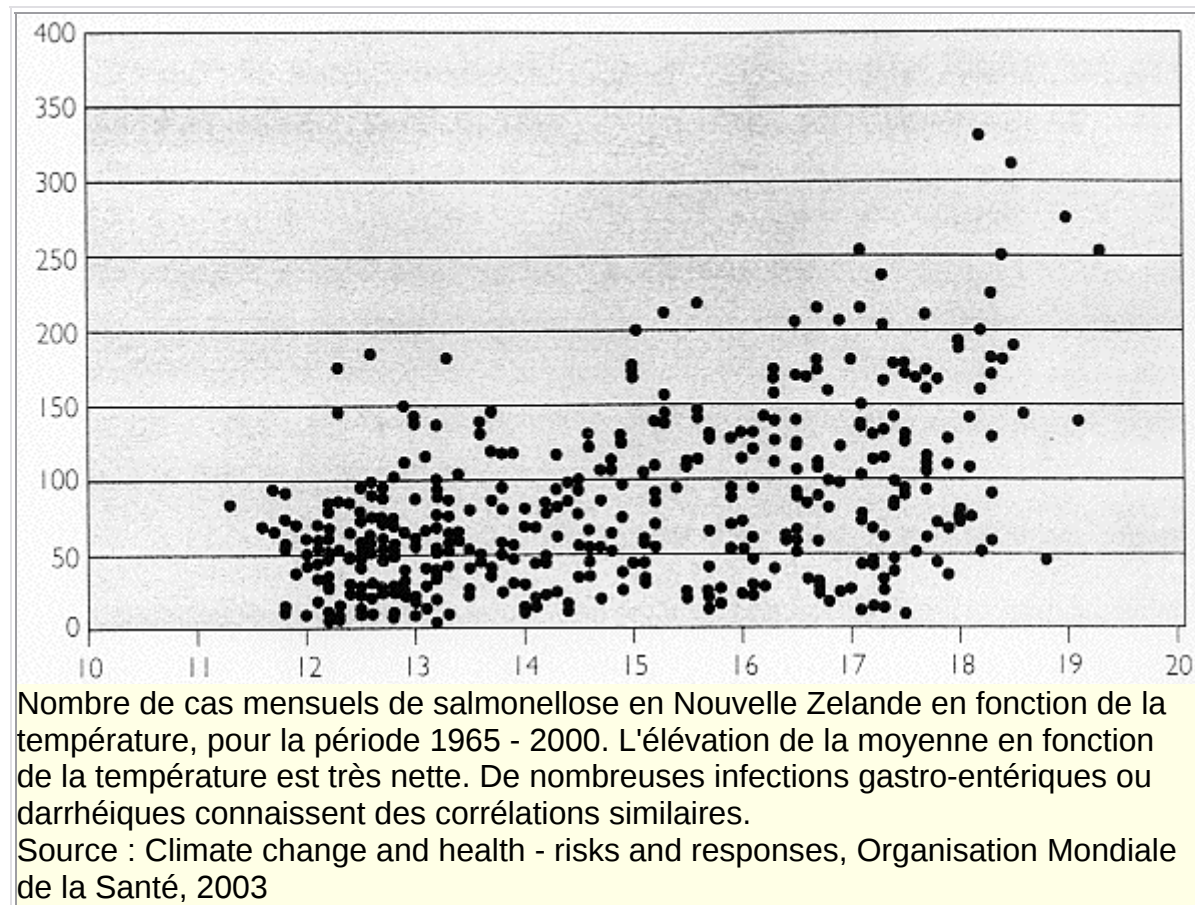
En ce qui concerne le changement climatique, on va donc chercher à estimer si une population exposée à

ce changement développe des maladies de manière différente d'une population non exposée. Cela pose bien sûr de redoutables problèmes de méthode, parce que de trouver deux groupes très nombreux, à la composition identique, au niveau de vie identique, aux habitudes identiques, etc, et dont les conditions climatiques étaient les mêmes au départ puis évoluent différemment n'est pas facile !

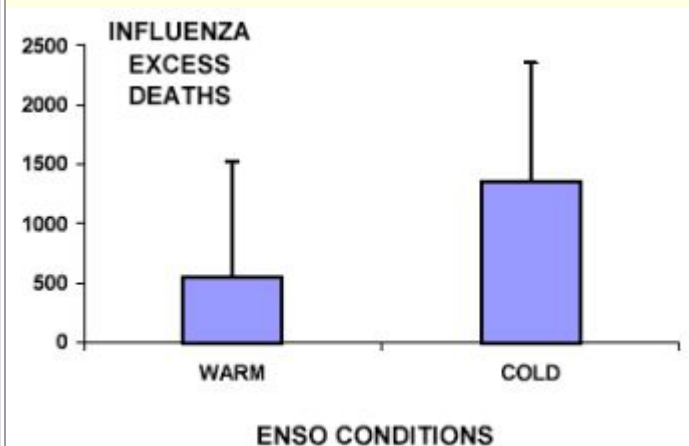
Il y a donc quelques cas dans lesquels des corrélations sont faciles à mettre en évidence, mais "attribuer" des morts au changement climatique ne sera jamais un exercice facile, du moins tant que la modification de l'environnement n'est pas encore très importante.

Il est donc facile de comprendre que pour bien des évolutions observées jusqu'à maintenant, faute de savoir précisément ce qui se serait passé en l'absence de changement climatique, nous resterons réduits à des suppositions. Cela n'empêche pas, toutefois, de proposer déjà quelques conclusions en matière de lien entre changement climatique et santé :

➤ Une augmentation de la température peut favoriser l'activité d'un microbe (bactérie ou virus), comme cela est mis en évidence sur le graphique ci-dessous.

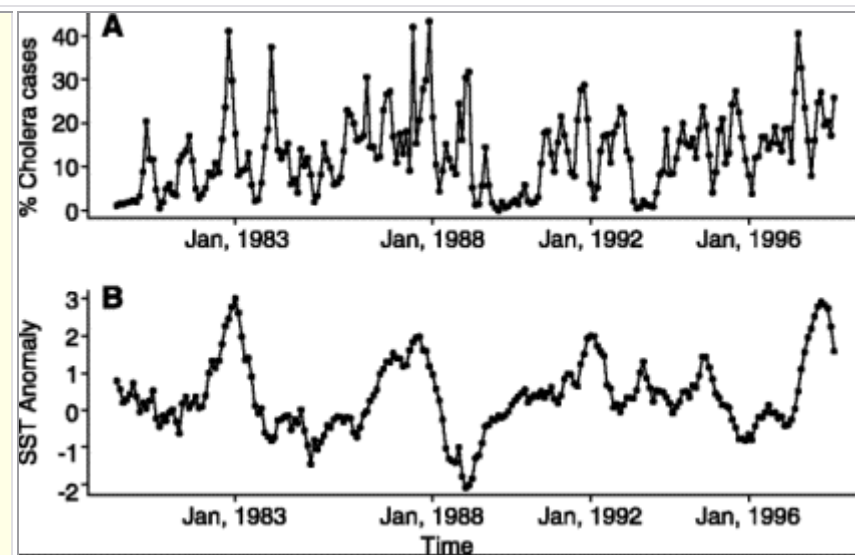


➤ Plus généralement, il existe des corrélations entre la prévalence de certaines maladies et les conditions climatiques, et donc la modification de ces dernières peut favoriser la propagation de maladies connues.... ou de nouvelles qui apparaîtraient.



Excès de mortalité dus à la grippe selon l'état de l'oscillation El Nino (warm) / La Nina (cold).

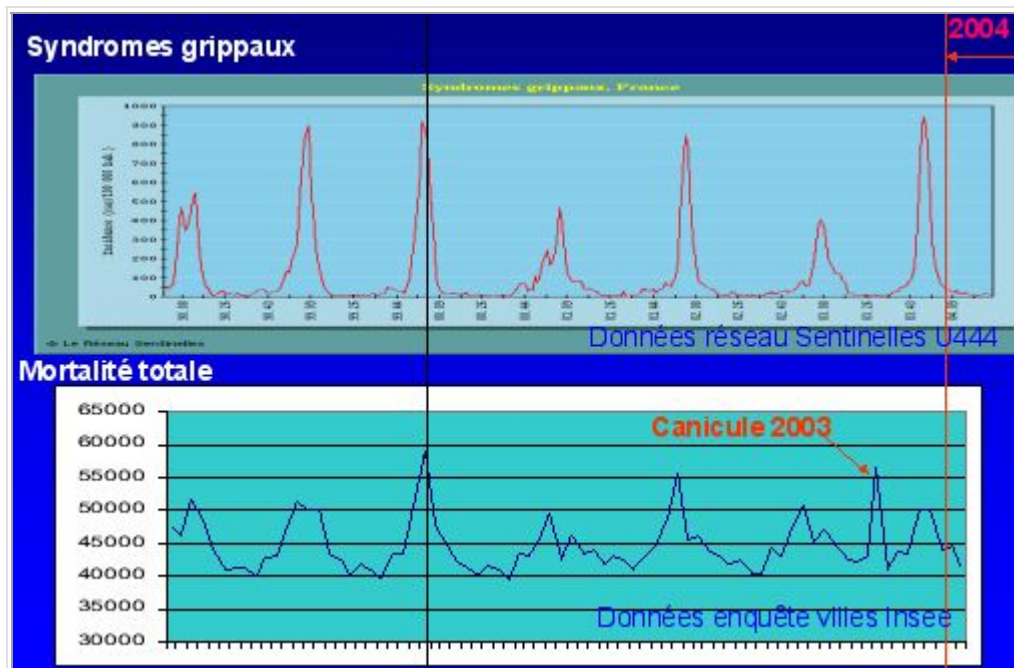
Source : Viboud et col., Eur J of Epidemiol, 2004



Prévalence du choléra selon la température de surface du Pacifique Equatorial Est. On note une assez forte corrélation entre les deux ; lorsque le Pacifique Equatorial Est se réchauffe (conditions El Nino) la prévalence du choléra peut être multipliée par 5 !

Source : Colwell, Science, 1996 et Pascual et col., Science, 2000.

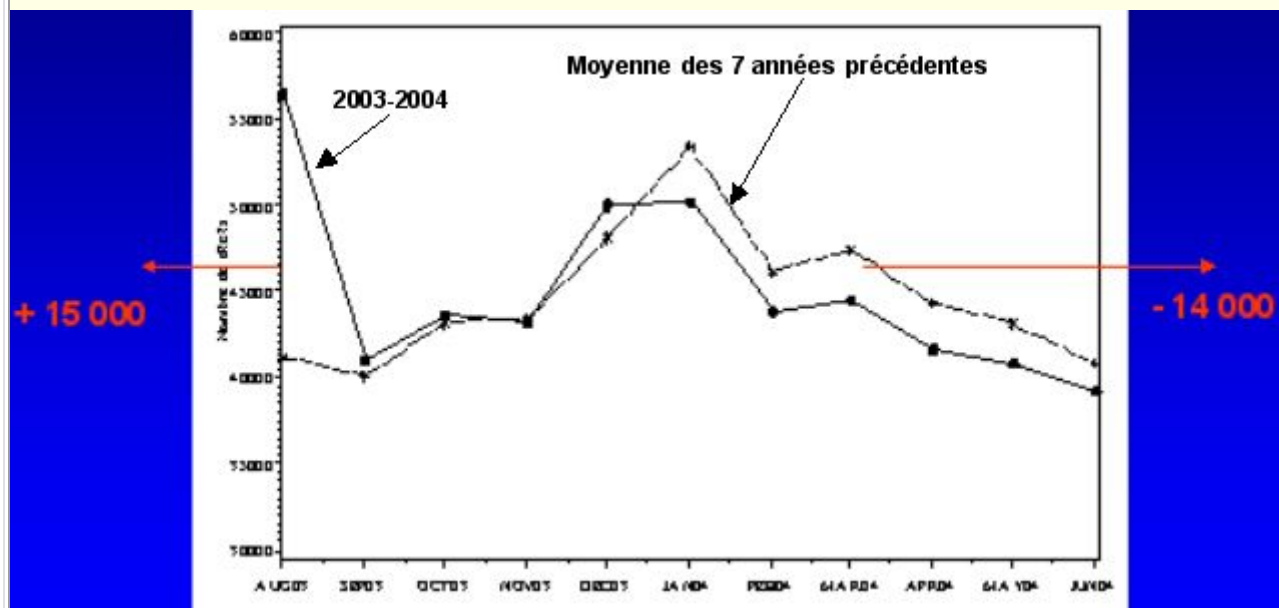
➤ Aux moyennes latitudes, une augmentation de la température peut modifier la répartition de la mortalité au cours des saisons. Actuellement, on meurt plutôt en hiver, en particulier à cause de la grippe, avec un second pic l'été, particulièrement saillant durant les périodes caniculaires.



Evolution des décès mensuels pour les années 1997 à 2003 (2004 partiel). On note que cette valeur oscille entre 40.000 et 60.000, avec un pic nettement marqué l'hiver, correspondant au maximum de la prévalence de la grippe. On note également le pic occasionné par la canicule de l'été 2003.

Source : [Alain-Jacques Valleron](#), intervention au Symposium du Collège de France, 12 octobre 2004

Un réchauffement global (qui [augmentera probablement le nombre et l'intensité des épisodes caniculaires aux moyennes latitudes](#)) provoquerait un renforcement du maximum estival et probablement une légère augmentation de la mortalité totale. Les décès supplémentaires en période de canicule sont souvent "compensés" par un déficit de décès dans les mois qui suivent, de telle sorte que le total annuel ne change pas tant que cela ; cela s'est par exemple constaté en 2003/2004 en France.



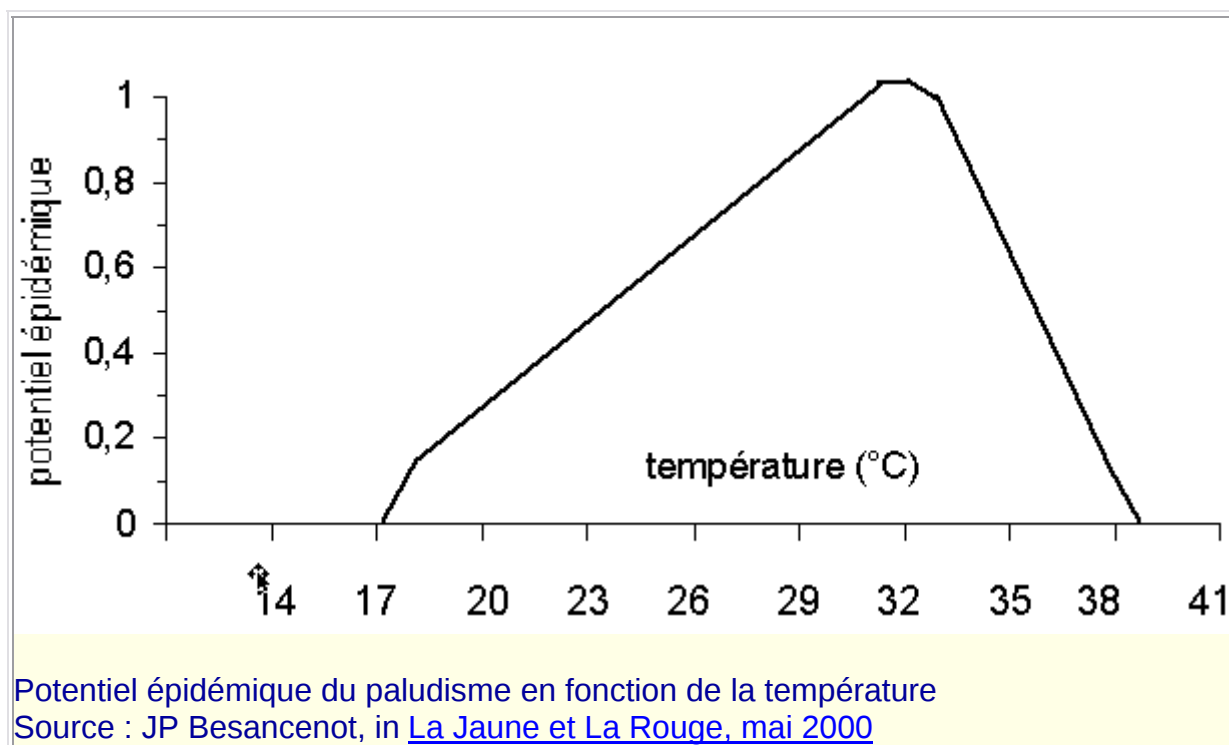
Décès mensuels pour l'année 2003-2004 et la moyenne des 7 années précédentes. On note que le surplus de 15.000 décès enregistré en août 2003 est suivi par un déficit de 14.000 décès de janvier à juin 2004. Cela accrédite l'idée que les personnes qui sont mortes pendant l'été 2003 seraient, pour l'essentiel, probablement mortes pas longtemps après de toute façon.

Le profil des personnes décédées (plus de 75 ans pour l'essentiel des décès) et leur fragilité sanitaire (les personnes décédées présentaient une "consommation médicale moyenne" double de la normale selon les statistiques de la CNAM) concourent aussi à étayer cette hypothèse.

Source : Valleron et Col, CRAS 2004 (Déc)

► Un réchauffement climatique étendra probablement les zones propices à la propagation de maladies dites à vecteur. Ce terme désigne les pathologies pour lesquelles l'agent pathogène (un microbe, un parasite....) est transporté par un "vecteur", c'est à dire un animal - en général de petite taille - qui est susceptible de contaminer l'homme, souvent par le biais de morsures ou de piqûres (un moustique ou une mouche, par exemple, mais aussi les puces, les tiques....).

► Une élévation de la température favorise - dans certaines limites, bien sûr - la vitesse de maturation - et donc le potentiel épidémique - du paludisme (aussi connu sous le nom de malaria), qui tue déjà plusieurs millions de personnes tous les ans (figure ci-dessous)



► Mais si nous nous en tenons aux seuls moustiques, ils sont aussi les vecteurs d'autres maladies : dengue, fièvre jaune, fièvre de la vallée du Rift... dont les conséquences possibles sur des populations nouvellement concernées (donc n'ayant pas eu l'occasion de s'immuniser partiellement) pourraient être très importantes.

► Enfin il n'y a pas que les moustiques qui puissent véhiculer des maladies : les mouches le peuvent aussi, parfois (maladie du sommeil par exemple), les puces (qui sont un vecteur connu de la peste, laquelle n'a pas disparu dans le monde)...

► Si le réchauffement climatique engendre de manière évidente une augmentation des [phénomènes extrêmes](#), il y aura bien sûr les morts causés par ces phénomènes. Rappelons que dans le cas des phénomènes qui incluent des précipitations intenses (ouragans, raz de marée, moussons diluviennes, etc.) c'est souvent l'eau plus que la force du vent qui tue, soit directement (noyades, glissements de terrain...) soit en favorisant des épidémies diverses après les inondations.

► Il est également possible - les études démarrent tout juste - que l'augmentation de la température globale, en chauffant le vaste bouillon de culture que représente notre planète, favorise les mutations plus rapides des micro-organismes et, partant, augmente la probabilité de voir apparaître des virus ou microbes pathogènes nouveaux.

Il convient enfin de noter que, comme pour tout "risque" lié au changement climatique, il faut à la fois regarder la manière dont le monde qui nous entoure peut changer, mais aussi comment s'améliorent nos moyens de réponse, ou au contraire quelles sont les évolutions simultannées qui peuvent affaiblir les capacités de résistance. De ce dernier point de vue, la concentration urbaine croissante, qui favorise les contaminations en série, et le développement massif du transport aérien, qui favorise les déplacements rapides d'un continent à l'autre des éventuels micro-organismes pathogènes, nous rend probablement plus vulnérables à l'apparition de nouvelles souches d'agents pathogènes.

Sur le plus long terme, le gros point d'interrogation de notre approvisionnement énergétique (comme pour le [pétrole](#), par exemple) est aussi d'une importance cruciale pour évaluer les conséquences du changement climatique sur la santé. L'énergie abondante permet de transporter la nourriture partout (évitant ainsi les famines là où la nourriture ne pousse plus), d'augmenter les rendements agricoles (avec les engrais et la mécanisation), de palier les conséquences du froid (avec le chauffage), des vagues de chaleur (avec l'air conditionné), de faire tourner les hôpitaux, et encore bien d'autres choses.

Selon que nous considérons que nous aurons toujours de l'énergie abondante dans un siècle, ou que nous aurons beaucoup moins d'énergie par personne (ou plus exactement beaucoup moins de services énergétiques), les conclusions sur les relations entre changement climatique et santé ne seront assurément pas les mêmes...

Les océans vont-ils tout submerger ?

dernière version : septembre 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Par suite de la dilatation de l'eau sous l'effet de la chaleur (l'eau chaude occupe un peu plus de volume que l'eau froide) et de la fonte des glaces polaires ou continentales (sous l'effet de la chaleur aussi), il est d'ores et déjà certain que le niveau de l'océan va augmenter. La seule question est de savoir de combien, et par ailleurs comment cela se répartira, car cette élévation de l'océan ne sera pas du tout homogène !

La première cause d'élévation du niveau des mers - la dilatation de l'eau sous l'effet de la chaleur - est la plus facile à prédire dès lors que la [température de la surface augmente](#). En effet, ce n'est un secret pour personne que l'eau océanique de surface (disons les 100 premiers mètres) va globalement se réchauffer en pareil cas, donc se dilater.

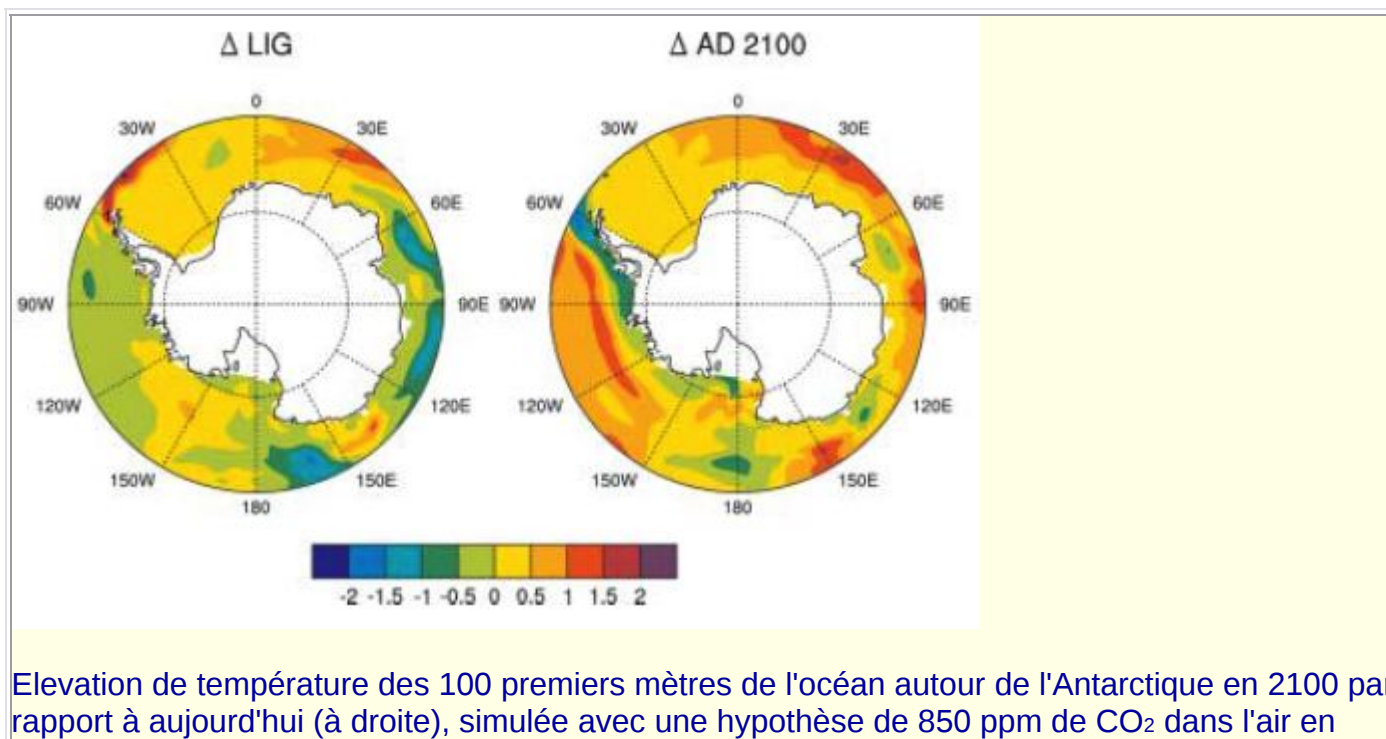
L'océan n'étant rien d'autre qu'une grande baignoire, si l'eau se dilate, le niveau monte. Dit comme cela le processus paraît simple, mais en fait il ne l'est pas tant que cela, parce que la baignoire se déforme lentement, sous l'effet de la tectonique des plaques, et si cela agrandit la baignoire la hausse va être localement moins forte, alors que si la baignoire se rétrécit en même temps les deux effets s'ajoutent (mais peuvent être tous deux compensés par autre chose, par exemple l'évaporation dans les mers quasi-fermées situées en zone chaude...).

Il y a un deuxième processus qui peut influencer sur le "niveau de la mer" au plan local : l'élévation de la côte. C'est le cas en Scandinavie, qui continue à "décompresser" après la disparition de la calotte glaciaire qui la couvrait il y a 20.000 ans et qui a fini de fondre il y a quelques milliers d'années : le poids de quelques km de glace (en épaisseur) était tel que sa disparition engendre un "rebond" du sol vers le haut.

Enfin une autre cause d'inhomogénéité sera tout simplement que le réchauffement ne sera pas homogène, et donc, "toutes choses égales par ailleurs", la dilatation qui en résultera pas plus.

De tout ce qui est exposé ci-dessus il résulte que l'élévation du niveau de la mer sous l'effet de la hausse des températures, valable globalement, ne fait pas obstacle à ce qu'il existe des endroits sur la planète où le niveau de l'eau baisse, soit dans l'absolu, soit par rapport au trait de côte, exactement comme une baisse locale de la température ne fait en rien obstacle à un réchauffement global.

L'élévation future sera donc plus ou moins rapide selon les endroits, en fonction de la hausse plus ou moins forte des températures, des autres éléments exposés ci-dessus, et du délai laissé à l'océan pour "rattraper" la hausse de température de l'air.



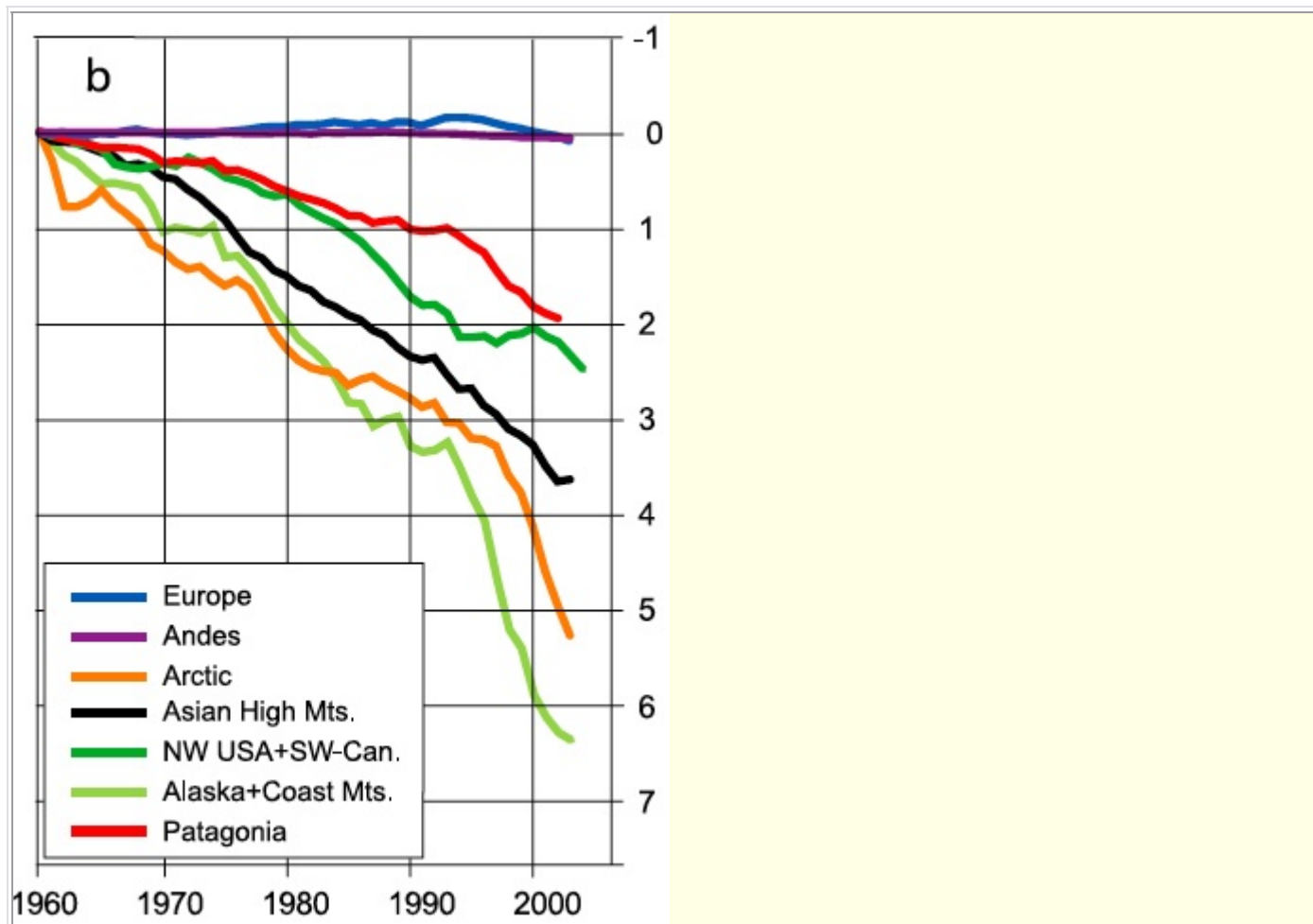
2100 (soit un triplement du CO₂ dans l'air entre 1800 et 2100). On voit que ce réchauffement n'est pas homogène.

L'image de gauche représente la différence de température simulée des 100 premiers mètres de l'océan entre aujourd'hui et le plus chaud de la dernière ère interglaciaire, il y a 130.000 ans. Avec le modèle utilisé, cette époque était donc un peu plus chaude qu'aujourd'hui.

Source : Overpeck et. al, Science, mars 2006

Il y a une deuxième cause possible à l'élévation du niveau des mers : la fonte des glaces continentales, c'est-à-dire tout les morceaux de glace, petits ou gros, qui sont posés sur la terre ferme. En effet, la banquise, qui flotte sur l'eau, ne fait pas plus monter le niveau de la mer quand elle fond que la fonte du glaçon dans un verre ne fait monter le niveau de l'eau (faites l'expérience).

Des morceaux de glace posés sur la terre, nous en avons dans les Alpes : les glaciers, qui ont des petits cousins un peu partout aux moyennes latitudes. Si tous les glaciers de ces moyennes latitudes fondent en totalité, ce qui n'est pas très loin de ce qui devrait finir par arriver avec un réchauffement un peu conséquent, l'océan mondial montera de 30 cm environ.



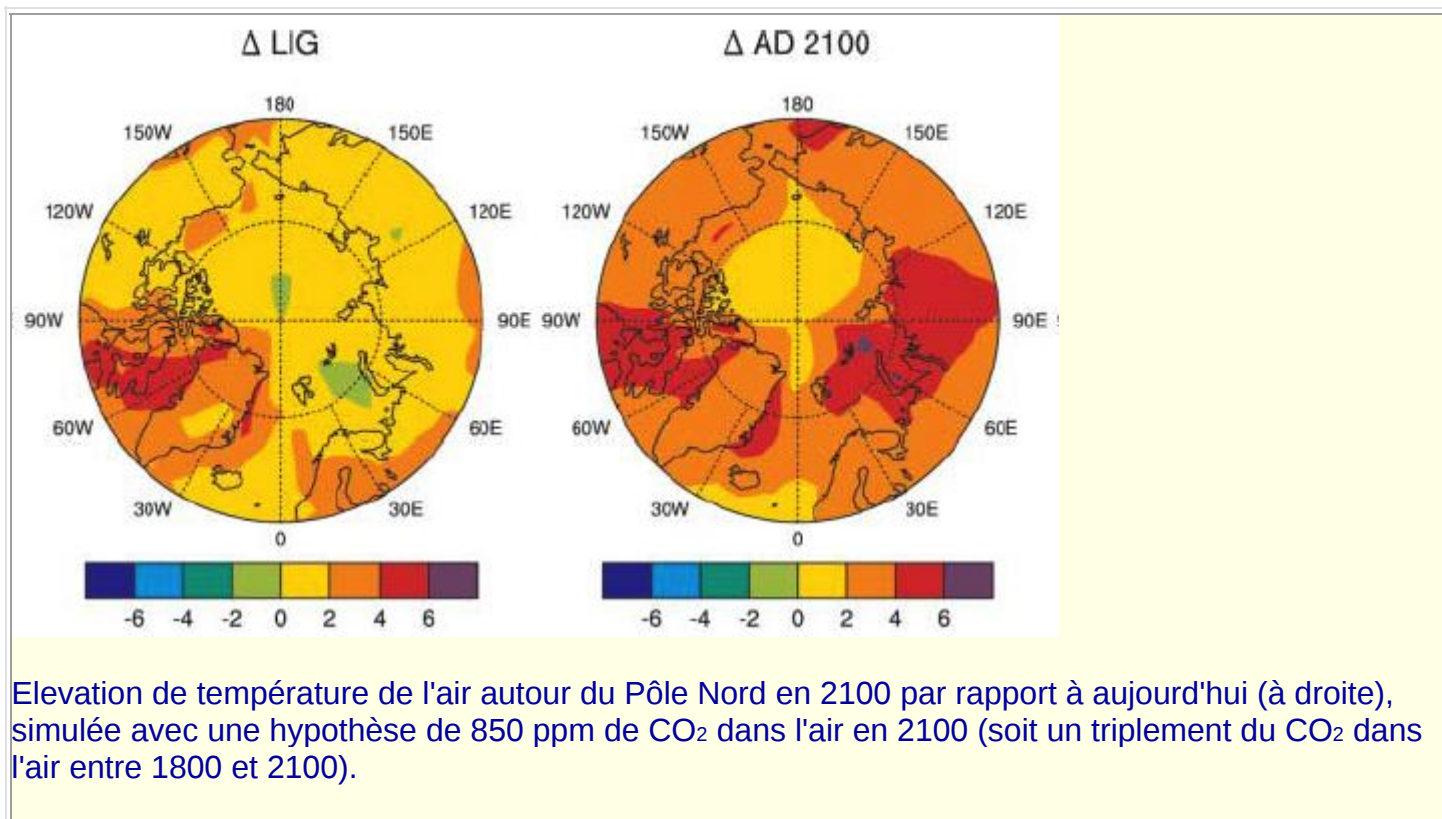
Evolution de la masse globale des glaciers continentaux depuis 1960, exprimée en contribution cumulée à l'élévation du niveau des océans (moyenne mondiale, en mm, échelle de droite).

Par exemple, les glaciers de l'Alaska ont contribué - à travers leur fonte - à une hausse du niveau

de l'océan de 6,5 mm environ depuis 1960.

Source : [GIEC](#), 4th assessment report (working group 1), 2007

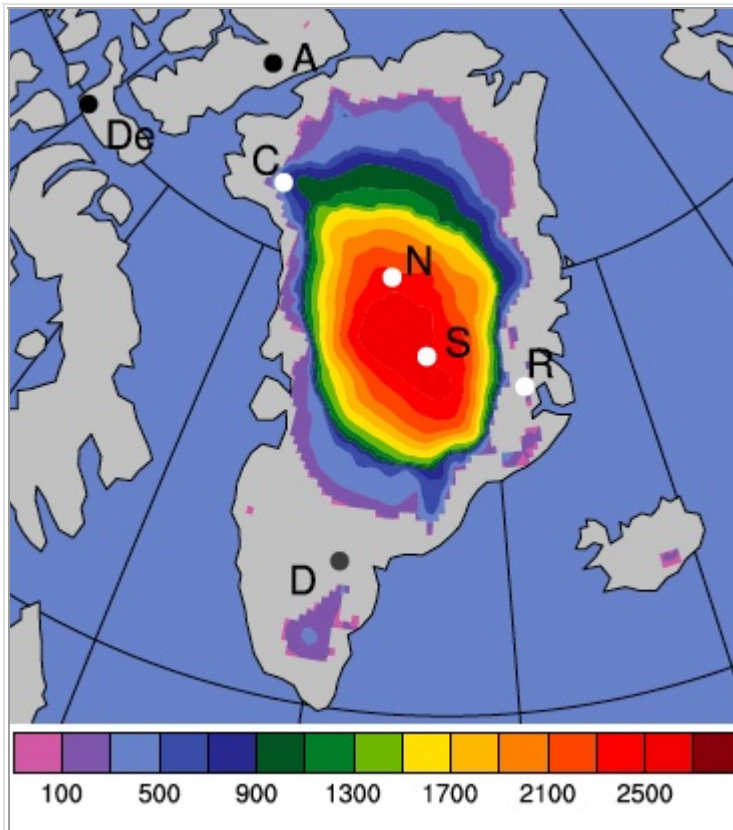
Ensuite, il va y avoir les calottes polaires qui vont se mettre de la partie, car il faut se rappeler que [l'augmentation de température sera particulièrement forte près des pôles](#).



L'image de gauche représente la différence de température de l'air (simulée aussi) entre aujourd'hui et le plus chaud de la dernière ère interglaciaire, il y a 130.000 ans. Avec le modèle utilisé, cette époque était donc un peu plus chaude qu'aujourd'hui, mais nettement moins que ce que nous pourrions connaître avec des émissions fortes.

Ce résultat (le fait que la température était un peu plus élevée il y a 130.000 ans) est important, parce qu'il semblerait que le niveau de la mer, à ce moment là, ait été de 4 à 6 m plus élevé qu'aujourd'hui, à cause de la fonte partielle du Groenland et de la calotte Antarctique de l'Ouest. Si cette fonte a pu se déclencher avec des élévations de température moindres que celle que nous pourrions connaître en 2100, alors cela renforce l'idée que le Groenland va fondre en totalité ou en partie, selon l'échéance et l'élévation de température effective si cette dernière est suffisante.

Source : Overpeck et. al, Science, mars 2006

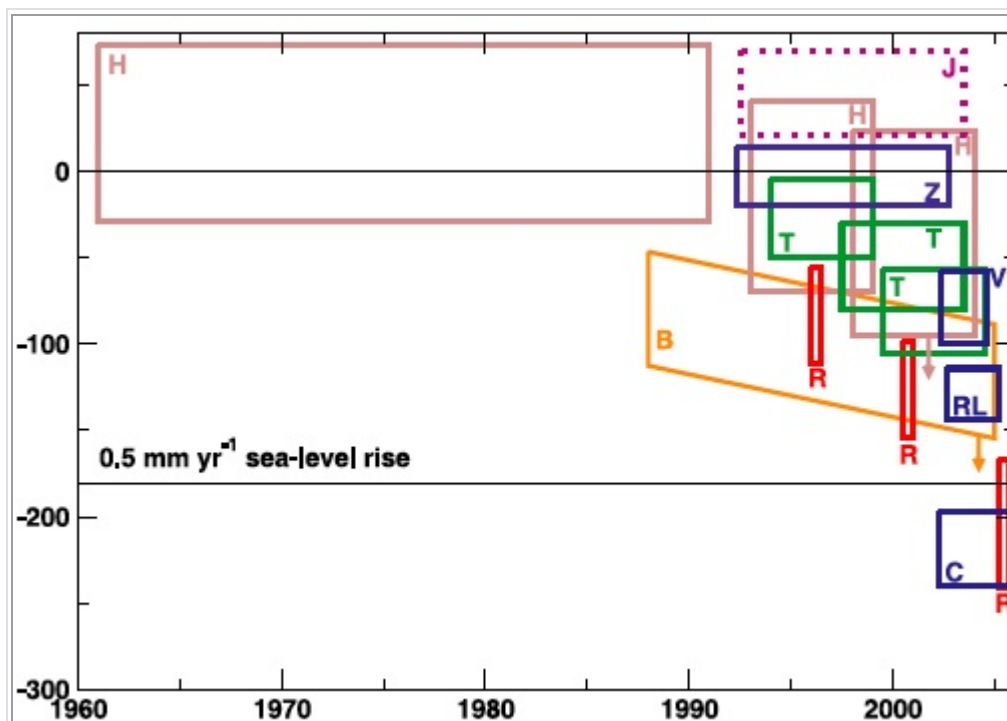


Reconstruction (par simulation) de l'étendue et de la hauteur de la calotte du Groenland au moment du dernier maximum interglaciaire, il y a 130.000 ans. Une forte diminution de la calotte à cette époque est très probable (et a engendré une élévation de 2 à 4 m du niveau de l'océan).

Source : [GIEC](#), 4th assessment report (working group 1), 2007

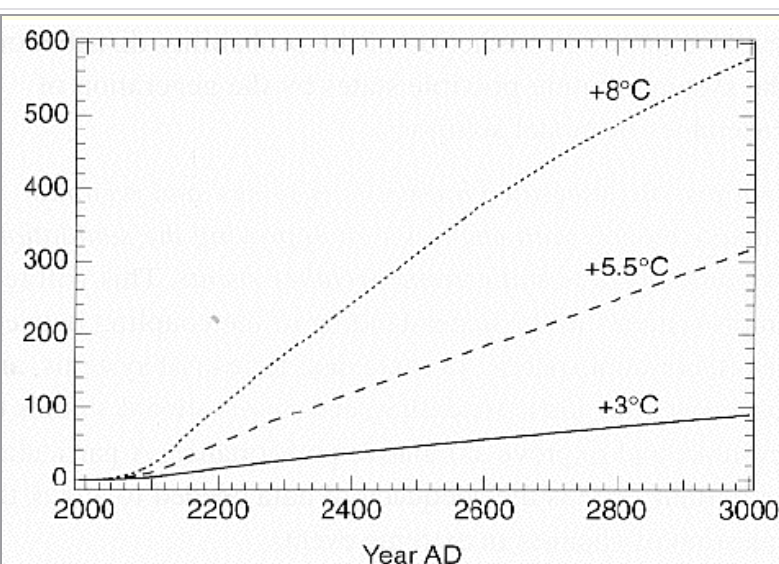
L'évolution en cours pourrait tout d'abord conduire à la fonte du Groenland d'ici quelques siècles à plus d'un millénaire. Plus exactement, le Gorenland pourrait commencer à fondre d'ici peu, et lorsque cette évolution se mettra en route elle sera largement

irréversible - car des processus d'amplification importants vont se mettre en route - et aboutira tôt ou tard à la fonte de l'essentiel de la calotte groenlandaise. Une élévation de 7 mètres du niveau de l'océan mondial est en jeu dans cette affaire.



Diverses évaluations du bilan de masse annuel du Groenland sur des périodes récentes, en milliards de tonnes de glace (gagnée ou perdue, selon que la valeur est positive ou négative) par an.

Chaque rectangle correspond à une étude particulière. Le côté horizontal du rectangle donne la durée de la mesure ou de l'évaluation, la hauteur est centrée sur la valeur la plus probable et donne l'incertitude. La lettre renvoie à la référence précise de l'étude (pour



Prédictions de l'élévation du niveau de la mer entre 2000 et 3000 en fonction de l'élévation de température à terme au-dessus du Groenland. Si la température au-dessus du Groenland finit par augmenter de 3°C, nous pourrions en faire fondre un morceau suffisant pour faire monter le niveau des océans de 1 m. Si la température s'élève de 8°C au-dessus du Groenland, ce dernier pourrait fondre en quasi-totalité, et le niveau des océans monterait alors de 6m.

Sachant que la température au-dessus du Groenland augmentera probablement 2 fois plus que la moyenne

l'ensemble il y en a une demi-page !).

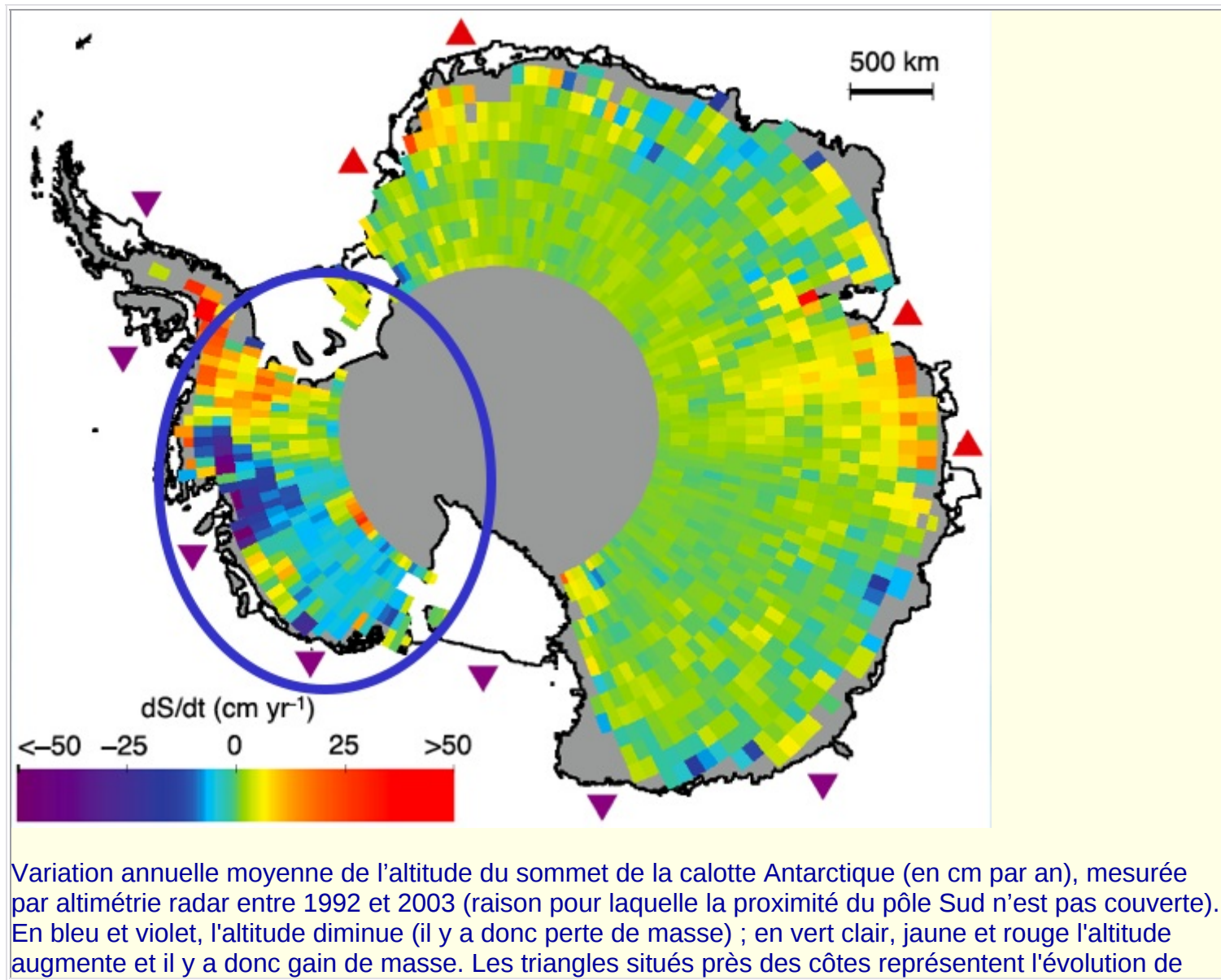
Les mesures les plus récentes suggèrent une forte accélération (depuis 1995, disons) de la perte de masse.

Source : 4th Assessment Report, [GIEC](#), 2007

[planétaire](#), et que l'élévation de température planétaire à terme (donc en 3000) sera [voisine du double de ce qu'elle est en 2100](#), le lecteur pourra en déduire que pour "faire" 8°C en plus au-dessus du Groenland en 3000, il "suffit " d'avoir 2° ou 2,5°C de plus en 2100 pour la moyenne planétaire...et [nous avons déjà signé pour 1,5 °C](#).

Source : [GIEC](#), 2001

Un autre amas glaciaire qui pourrait ne pas résister à l'évolution en cours serait la calotte occidentale de l'Antarctique (la fonte totale de l'Antarctique - qui représenterait 60 mètres d'eau en plus - n'est pas à l'ordre du jour à ces échéances), qui a semble-t-il déjà commencé à subir les effets du [réchauffement en cours](#).

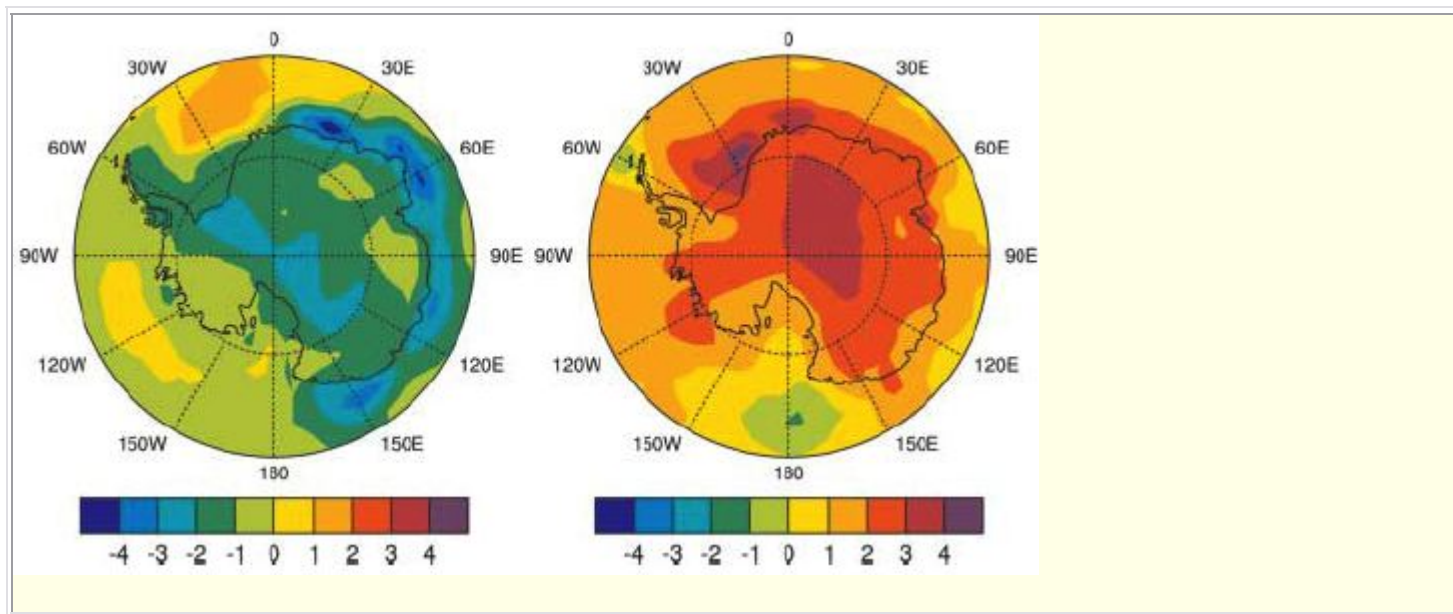


l'épaisseur des langues de glace qui prolongent la calotte et flottent sur l'eau : en rouge, forte augmentation, en violet, forte diminution.

Le bilan pour la totalité de la calotte Antarctique reste incertain pour la décennie qui vient de s'écouler, mais par contre on note une baisse globale de la masse pour la partie de la calotte qui se trouve à l'intérieur de l'ellipse bleue, et qui s'appelle la Calotte Occidentale de l'Antarctique (en anglais, West Antarctic Ice Sheet, ou WAIS). C'est surtout elle qui est "à risque" dans le cadre du réchauffement climatique en cours et sa fonte ou désintégration totale représente environ 6 mètres d'eau en plus pour l'ensemble des océans du globe.

Source : [GIEC](#), 4th assessment report (working group 1), 2007

Comme pour le Groenland, en effet, l'Antarctique pourrait connaître une élévation de température de l'air supérieure à la moyenne mondiale, et bien supérieure à ce que nous avons connu pendant la dernière ère interglaciaire, il y a 130.000 ans.

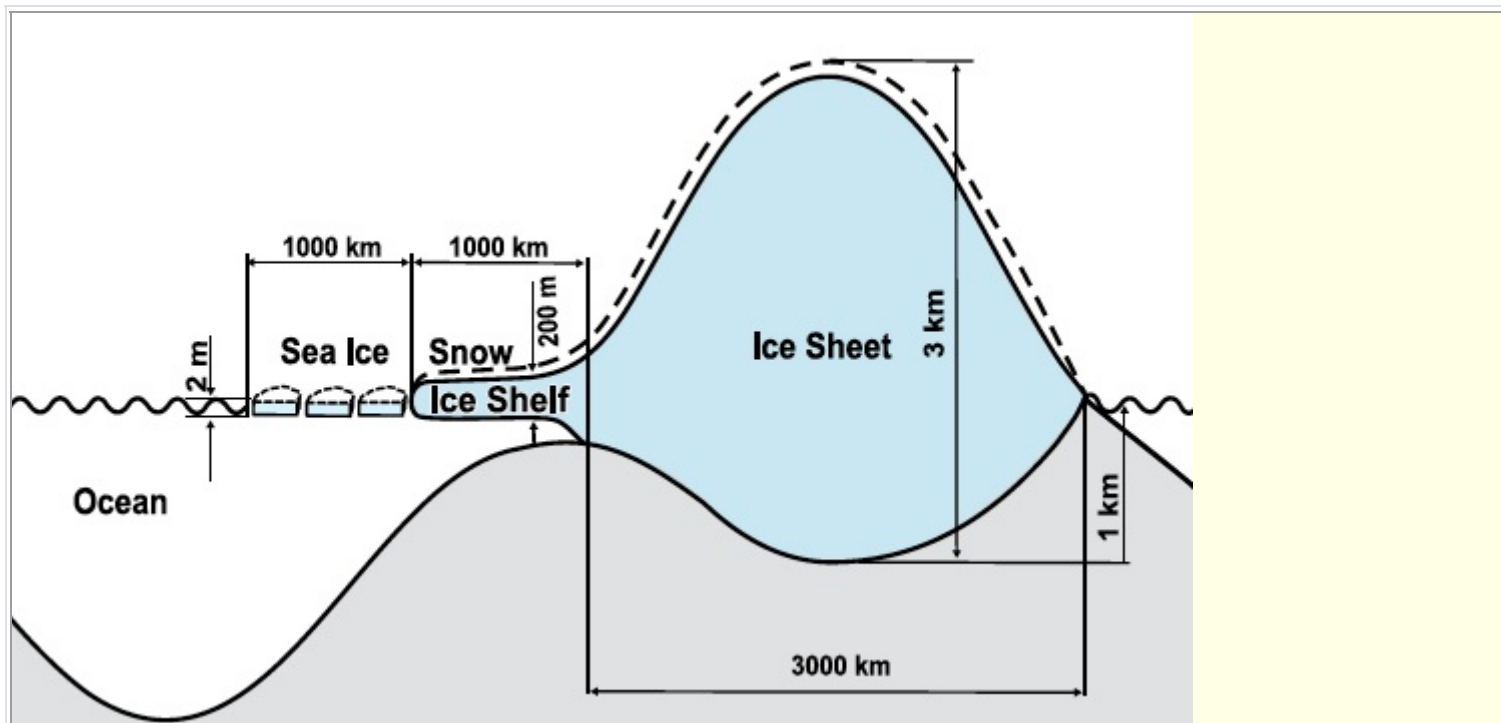


Elevation de température de l'air autour du Pôle Sud en 2100 par rapport à aujourd'hui (à droite), simulée avec une hypothèse de 850 ppm de CO₂ dans l'air en 2100 (soit un triplement du CO₂ dans l'air entre 1800 et 2100).

L'image de gauche représente la différence de température de l'air (simulée aussi) entre aujourd'hui et le plus chaud de la dernière ère interglaciaire, il y a 130.000 ans. Avec le modèle utilisé, cette époque était donc un peu plus froide qu'aujourd'hui. Cela suggère que la calotte Antarctique de l'Ouest n'a pas fondu lors de la dernière ère interglaciaire.

Source : Overpeck et. al, Science, mars 2006

La combinaison d'une eau plus chaude et dont le niveau sera plus élevé, attaquant ainsi plus "vigoureusement" les langues glaciaires qui prolongent les glaciers continentaux et flottent à la surface de l'eau, et d'un air plus chaud, rend possible la "désintégration" de la Calotte Occidentale de l'Antarctique au cours du présent millénaire (avant 3000), sans qu'aucune échéance précise ne puisse néanmoins être évoquée.



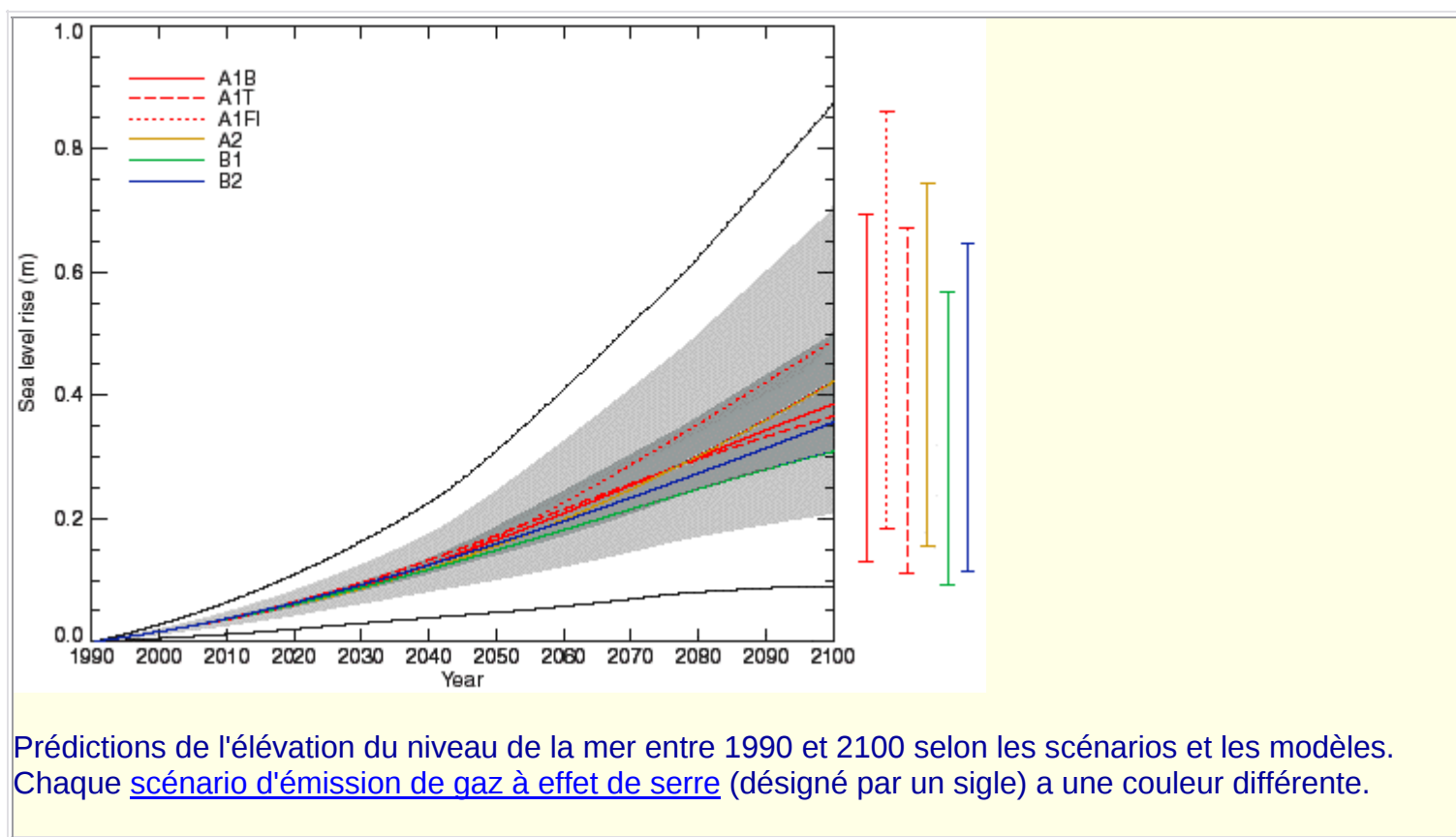
Représentation schématique de la calotte occidentale de l'Antarctique, qui repose sur un socle rocheux sous-marin. Si le vent augmente (plus de vagues/houle) et/ou si la température de l'eau augmente et/ou si le niveau de la mer monte, tout cela concourt à attaquer plus vigoureusement la langue de glace flottante appelée "ice shelf". Dans le cas de la calotte occidentale de l'Antarctique, il se trouve que cette langue est arc-boutée sur l'autre partie du continent et concourt à stabiliser l'ensemble.

Sa disparition à cause des modifications environnementales pourrait par ricochet entraîner la "désintégration" de cette calotte occidentale de l'Antarctique.

Source : [GIEC](#), 4th assessment report (working group 1), 2007

La combinaison de la dilatation de l'eau océanique, de la fonte partielle ou totale du Groenland, et de la "désintégration" de la Calotte Occidentale de l'Antarctique rend ainsi possible une élévation du niveau des océans dépassant 10 mètres pour le millier d'années qui vient (mais c'est le haut de la fourchette).

A l'échéance de 2100, cependant, c'est pour l'essentiel la dilatation et la fonte des glaciers des moyennes latitudes qui vont dominer l'augmentation du niveau des océans, qui ne sera pas "considérable" : 1 mètre tout au plus, et les évolutions les plus probables seraient plutôt décimétriques (cf. ci-dessous), sachant qu'au 20^e siècle l'océan est monté de 20 cm environ.



Pour une couleur donnée, donc un scénario donné, la barre à droite de cette couleur donne la fourchette de l'élévation possible du niveau de la mer en 2100, selon les modèles. Par exemple le scénario A1B, en rouge plein, engendre une élévation du niveau de la mer de 13 à 70 cm selon les modèles. Le scénario B2, en vert, conduit à 10 à 57 cm en plus selon les modèles, etc. La courbe de la couleur correspondante matérialise l'évolution médiane (c'est à dire "au milieu") pour l'ensemble des modèles.

La zone gris foncé représente l'enveloppe des évolutions médianes tous scénarios confondus, et la zone gris clair montre le surcroît de différence (on parle de "dispersion" des résultats) ajouté par le fait que pour un même scénario les différents modèles donnent des résultats différents.

Source : [GIEC](#), 2001

Une élévation de cet ordre peut cependant déjà poser les problèmes aux zones côtières, près desquelles vit 50% de l'humanité (pour être précis 50% de l'humanité vit à moins de quelques dizaines de km des côtes). On peut ainsi redouter l'invasion par la mer de zones d'estuaires (biologiquement très riches et souvent cultivées), l'augmentation significative des risques d'inondation lors de tempêtes, etc.

Toutefois, sans verser dans le cynisme, les conséquences associées à une élévation de quelques décimètres du niveau de la mer sont probablement moins redoutables que d'autres, car elles restent locales : un [virus invincible](#), le [retour vers un âge semi-glaciaire en Europe](#), ou la [désertification des 3/4 de la planète](#) sont un péril pour une large fraction de l'humanité, alors qu'une élévation de quelques décimètres du niveau de la mer est localement très gênante (les Hollandais apprécieront !) mais pas dramatique pour notre espèce : en un siècle on aurait largement le temps de construire les digues appropriées (même à la main, [si le pétrole a cessé d'être abondant](#) !) ou de déplacer quelques pâtés de maisons. Le fait que quelques états polynésiens se retrouveraient peut-être sous l'eau ou que les paysans du delta du Bangladesh doivent déménager sera certes une catastrophe locale, mais ne risque pas de déboucher sur une catastrophe globale comme les risques précédemment cités.

Par contre, ce qui est très ennuyeux, c'est que le processus ne va pas s'arrêter au bout d'un siècle : le niveau des océans va continuer à s'élever pendant les siècles à venir, et d'autant plus que l'élévation de température sera forte. Tout d'abord la [température va continuer à monter](#) après 2100, à cause de la [considérable inertie](#) du réchauffement, et donc la dilatation de l'océan va se poursuivre tant que la température montera, et elle se poursuivra même ensuite pendant des milliers d'années, en

réponse à l'augmentation de température de l'air alors que ce dernier se sera stabilisé (car il faut du temps pour que la chaleur se propage dans l'épaisseur de l'océan, même une fois que l'air a chauffé).

Les ressources marines

Il n'y a pas que le niveau de l'océan qui soit susceptible de poser problème : ce qui se passe en son sein pourrait aussi nous causer quelques soucis.

L'évolution climatique pourrait d'abord modifier - ou ralentir, ou arrêter - certains [courants marins](#). Or ces courants jouent un rôle important dans les climats régionaux, ainsi que dans les conditions de vie au large, et leur modification pourrait [avoir des répercussions très gênantes à plusieurs titres](#).

Ensuite les bancs de corail, qui sont un composant clé de la majeure partie des écosystèmes marins côtiers des tropiques, sont très sensibles aux variations de température : quelques degrés en plus leur sont généralement fatals (ils blanchissent puis meurent en pareil cas). Or comme nous aurons [beaucoup de mal à éviter que la température planétaire n'augmente de 1,5 à 2 °C au moins](#), il est légitime de se demander si la majeure partie des coraux ne sont pas d'ores et déjà condamnés à l'horizon d'un siècle ou deux.

Enfin l'océan va s'acidifier en absorbant du CO₂, et là aussi il y a un [facteur de risque pour la vie marine](#).

Il est difficile d'imaginer les réactions en chaîne qui pourraient suivre, parce que nos connaissances sur le degré précis d'interdépendance des espèces sont souvent parcellaires, les espèces les plus visibles n'étant pas nécessairement les plus "indispensables". Par exemple la simple disparition des abeilles sous nos latitudes serait probablement fatale à bon nombre de plantes, alors que la disparition des tigres, qui sera une histoire triste et spectaculaire (et malheureusement vraisemblable), n'est pas susceptible de mettre en péril d'autres espèces. Dans l'océan, que savons nous des valeurs limites que les espèces clé de voûte sont capables de supporter ? Si rien ne permet d'affirmer que la vie dans son ensemble soit menacée, des surprises désagréables ne sont pas à exclure...

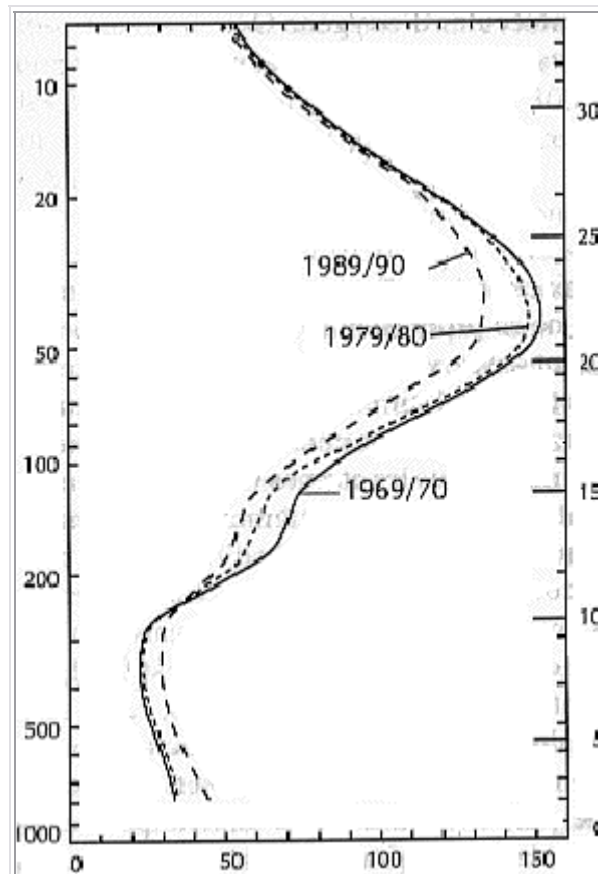
Le "trou" dans la couche d'ozone va-t-il augmenter ?

dernière version : septembre 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Il s'agit là d'une interaction pouvant paraître étonnante : comment le changement climatique peut-il agir sur la "couche d'ozone" ? Rappelons tout d'abord que changement climatique et "trou dans la couche d'ozone" sont [deux processus provoqués par des causes bien distinctes](#).

Rappelons aussi que nous parlons ici de l'ozone stratosphérique, c'est à dire du "bon" ozone, celui qui se trouve dans la stratosphère, entre 10 et 30 km au-dessus de nos têtes. La "couche" d'ozone ne mesure bien sûr pas 20 km d'épaisseur, et en fait il ne s'agit pas d'une couche - comme une couche de neige - mais juste d'une concentration supérieure en ozone à ces altitudes qu'ailleurs dans l'atmosphère (graphique ci-dessous).



Pression partielle d'ozone en millièmes de millibar (axe horizontal), en fonction de l'altitude (axe vertical de droite). La pression atmosphérique totale à l'altitude considérée est indiquée sur l'axe de gauche en millibars. Les trois courbes représentent la concentration d'ozone pour 3 années différentes.

On constate facilement que la proportion de l'ozone dans l'air n'excède pas 0,5% :

un peu mince pour une vraie couche !

On constate aussi qu'au fil du temps l'ozone diminue en altitude mais augmente près du sol.

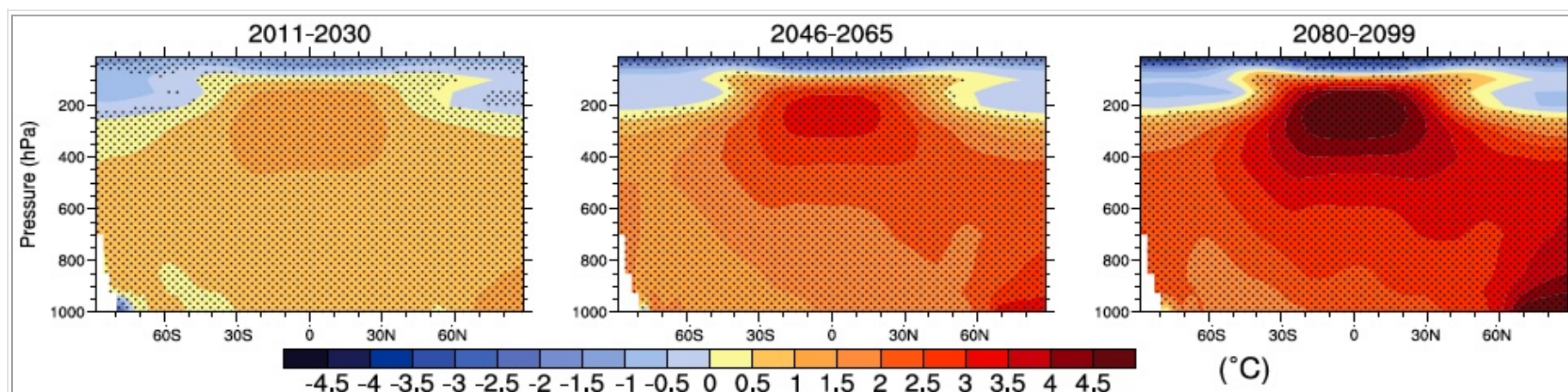
Source : Gérard LAMBERT, L'air de notre Temps, Seuil 1995

Pour en revenir à l'action possible du changement climatique sur la raréfaction de cet ozone, le système de dominos fonctionne de la manière suivante :

- certaines émissions humaines (les CFC) dégradent l'ozone stratosphérique (celui de la fameuse "couche d'ozone") à cause du chlore que ces composés libèrent dans la haute atmosphère. Il s'agit d'un phénomène se produisant en permanence.
- mais ce phénomène peut se trouver particulièrement amplifié au printemps au-dessus du Pôle Sud, et cause alors le fameux "trou d'ozone". Les raisons en sont les suivantes :
 - ▶ lorsque le Pôle Sud est plongé dans la nuit de l'hiver austral, les CFC ne sont plus dégradés par les ultraviolets du Soleil au-dessus de cette zone (voir les explications sur [cette autre page sur l'ozone](#)).
 - ▶ pendant cet hiver les températures descendent très bas (de l'ordre de -80°C) dans la stratosphère, ce qui y permet l'apparition de nuages formés de petits cristaux de glace (les nuages stratosphériques polaires). Cette glace n'est pas pure, mais contient également de l'acide sulfurique et/ou nitrique.
 - ▶ ces cristaux servent de catalyseur et permettent aux CFC de libérer leur chlore sous des formes qui n'agissent pas directement sur l'ozone. Ce processus se poursuit pendant tout l'hiver austral, tant qu'il y a ces fameux nuages stratosphériques polaires,
 - ▶ pendant l'hiver austral, l'air qui surmonte le pôle forme une espèce de grand tourbillon (le vortex) qui bloque la communication entre l'air qui s'y trouve et le reste de l'atmosphère. De la sorte, l'accumulation de chlore reste confinée au-dessus du pôle.

► lorsque le Soleil réapparaît, au printemps austral, ses ultraviolets dissocient d'un coup tous les composés chlorés accumulés pendant l'hiver austral, libérant alors le chlore sous forme atomique, lequel attaque immédiatement l'ozone stratosphérique dont 90% peut disparaître en quelques semaines.

➤ or si l'effet de serre augmente, cela [augmentera la température de la partie basse de l'atmosphère](#), mais diminuera corrélativement l'apport d'énergie à la stratosphère, qui va avoir tendance à se refroidir en moyenne, et en particulier va atteindre plus tôt dans l'hiver austral des températures très basses.



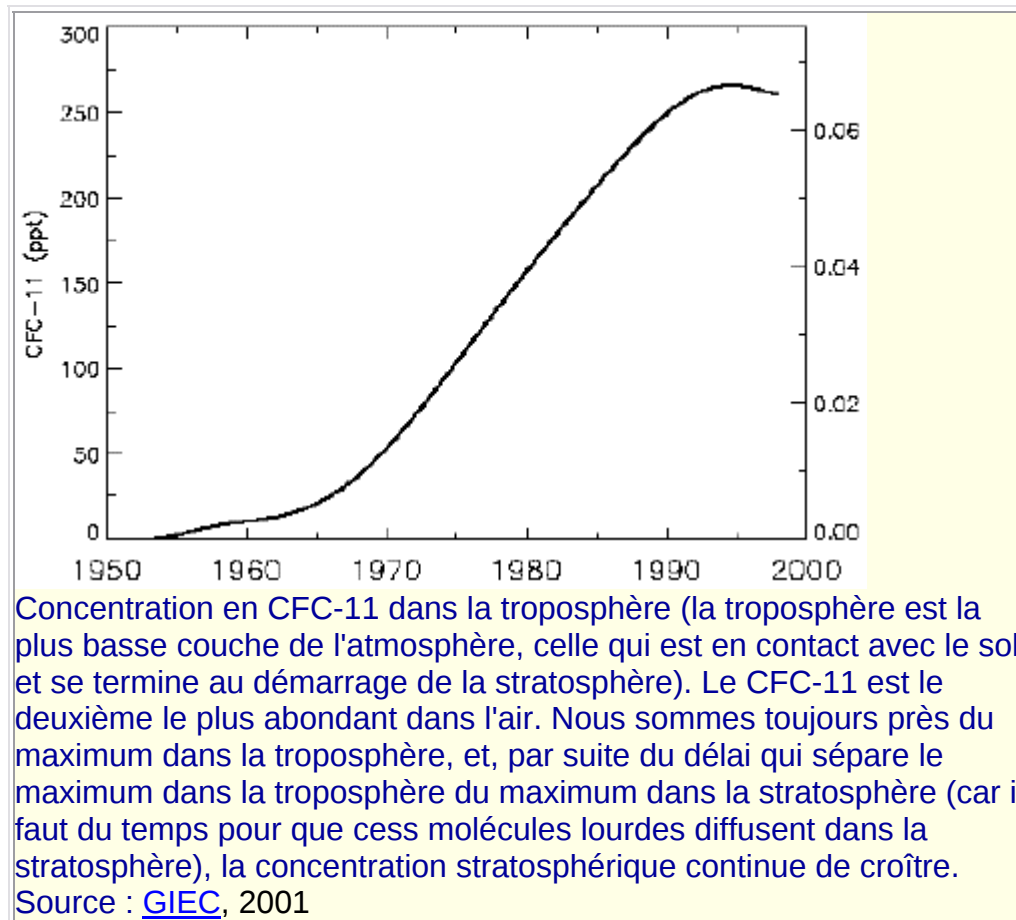
Le graphique ci-dessus représente l'évolution des températures dans l'atmosphère en fonction de l'altitude et de la latitude (et de la période), pour le scénario A1B (soit environ un doublement des émissions entre 2000 et 2100), sur 3 périodes différentes. L'axe horizontal donne la latitude (l'Equateur est à zéro, et les Pôles à 90 Nord et Sud). L'axe vertical indique la pression en hectopascals, qui décroît quand on s'élève ; la stratosphère débute à environ 200 hectopascals (un peu moins à l'équateur) et à 0 on est sorti de l'atmosphère !

Plus on va vers le rouge et plus cela se réchauffe, et plus on va vers le bleu puis violet et plus cela se refroidit. On voit clairement que les plus hautes couches de l'atmosphère se refroidissent partout au cours du temps : en particulier, le "réchauffement" climatique refroidira de plus en plus la stratosphère au-dessus des pôles.

Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007

- Cela peut donc entraîner une augmentation de la période où l'accumulation de chlore sera possible, et par contrecoup une diminution accrue de l'ozone stratosphérique au moment du printemps austral,
- et surtout, un tel phénomène pourrait voir le jour au-dessus du Pôle Nord, où la température de la stratosphère commence à descendre suffisamment bas l'hiver pour permettre l'apparition de nuages stratosphériques, qui constituent un catalyseur indispensable. Si un tel "trou" se manifestait au-dessus du Pôle Nord, ce pourrait être plus ennuyeux pour les hommes et animaux terrestres, car les moyennes latitudes australes sont peu dotées en terres émergées, comportant juste quelques millions de Néo-Zélandais et d'Argentins de la Terre de Feu, alors que les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord hébergent un milliard d'individus.

Mais, puisqu'il est maintenant interdit de produire des CFC, y-a-t-il encore de ces composés dans la stratosphère ? Hélas oui : les CFC ont une durée de vie très longue (des dizaines à des centaines d'années) et la concentration de CFC est encore proche du maximum jamais atteint. En outre on trouve un peu de chlore dans la stratosphère de manière parfaitement naturelle.



Par un "effet domino", on voit donc que le changement climatique risque donc d'entraîner une diminution supplémentaire de la couche d'ozone. Il faut savoir que - cas extrême impossible à l'horizon de visibilité, heureusement - si la couche d'ozone disparaissait totalement, toute vie terrestre évoluée finirait probablement par être rapidement éradiquée ailleurs que sous l'eau.

Les hommes sauront-ils rester sereins ?

dernière version : septembre 2003

Des modifications climatiques de grande ampleur, selon la région où elles surviendraient, pourraient déséquilibrer ou achever de déstabiliser un équilibre géopolitique local déjà instable et favoriser des évolutions propices aux conflits.

- Une nouvelle donne pour les zones favorables (pour l'[agriculture](#), la [santé](#), ou toute autre raison...) peut engendrer des migrations importantes, or bien des endroits sur Terre sont déjà occupés et les arrivants ne seront pas nécessairement les bienvenus. Si, comme certaines [simulations](#) le suggèrent, le Maghreb se désertifie progressivement, que seront tentés de faire les 150 millions de Maghrébins ? Si la Sibérie devient un vert Paradis et une large partie de la Chine un désert, quelles envies - légitimes ou pas, là n'est pas la question - pourraient naître chez les Chinois ?
- Si certains états continuent à refuser obstinément de prendre leur part à la [réduction des émissions](#) alors que d'autre commenceraient à prendre de plein fouet les conséquences d'un changement climatique, que peut-il se passer ? Que se passera-t-il si des pays développés (donc potentiellement puissants sur le plan militaire), qui connaissaient des conditions climatiques également favorables, se mettent à évoluer suivant des trajectoire opposées ?
- Sachant qu'une perturbation majeure amènerait probablement - entre autres choses - une [récession massive et persistante](#), sachant ce que des récessions passées ont pu amener comme conséquences (un épisode précédent, il y a 70 ans, n'a pas été très réjouissant...), comment qui que ce soit pourrait écarter d'un revers de la main que des guerres et des dictatures puissent résulter de cette perturbation climatique, même dans des pays qui considèrent que ce genre de fléau appartient définitivement au passé simplement parce que cela fait un certain temps qu'ils n'ont pas connu ce genre de chose ?

Ajoutons à ces quelques questions que nous vivons dans un monde où les armes de destruction massive tendent à se banaliser (et je ne les considère pas comme moins dangereuses quand elles sont dans les mains de pays dits développés, qui ont été tout aussi capables que les autres de produire des dictatures, des guerres civiles ou des guerres "normales"...), et que le fait que nous nous soyons abstenus de nous battre entre pays développés depuis 60 ans ne constitue pas une assurance tous risques pour l'avenir, et le lecteur comprendra qu'un écrivain imaginaire pourrait nous proposer bien des scénarios catastrophe possibles basés sur un dérèglement du climat.

Comment les hommes gèreront-ils les suites - et notamment les mauvaises surprises - du changement climatique ? C'est peut-être de là, pourtant, que viendront les conséquences les plus désagréables....

N'y aura-t-il pas des régions épargnées par le changement climatique ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Il est humain - même si ce n'est pas très altruiste ! - de se demander si le problème ne sera pas uniquement pour le voisin.

Rien n'est moins sûr en ce qui nous concerne :

➤ d'une manière générale, quelle que soit la partie du monde concernée il est rigoureusement impossible de savoir à l'avance si il y aura un sanctuaire, car les prévisions locales des [modèles](#) sont difficiles à établir. C'est le verre à moitié vide ou à moitié plein : on peut soit se dire que cette incertitude ne nous garantit pas le pire, soit se dire qu'au contraire cela ne nous garantit pas de "passer à travers". C'est selon !

➤ en ce qui concerne l'Europe on ne peut exclure aucun des risques identifiés : nous ne sommes à l'abri ni de la [migration vers le Nord des maladies tropicales](#), ni d'une [disparition de la moitié de nos forêts](#), de l'[arrêt du Gulf Stream](#), ni de la [folie des hommes](#) qui pourrait résulter du reste.....

➤ En ce qui concerne les [phénomènes extrêmes](#), il y a des indices tendant à montrer que le risque de les voir gagner en fréquence et/ou en intensité (en Europe) n'est pas nul. Et si il prenait le mauvais goût à quelques ouragans de passer un peu plus fort, un peu plus souvent, et en septembre plutôt qu'en décembre, quand les feuillus offrent toute la prise au vent, toutes choses qui sont parfaitement possibles, on peut imaginer que nous ne serions pas ravis !

➤ Il y a même un risque qui est spécifique à l'Europe (ou plus exactement à l'ensemble de l'Atlantique Nord), qui est celui de la "surprise" climatique, à savoir un [ralentissement ou une disparition de la circulation océanique globale dans l'Atlantique Nord](#), qui engendrerait une baisse brutale (en quelques décennies) et majeure (plus de 5 degrés) de la température moyenne sur

l'Europe, au moins sur sa facade Atlantique. La survenue d'un tel phénomène serait une catastrophe pour les écosystèmes en général et l'agriculture en particulier.

Il n'est donc pas raisonnable de penser que nous ne serons pas concernés, même si la presse indique volontiers que les plus touchés seront les pays en voie de développement. De fait ce sont eux qui connaissent actuellement le plus de cyclones et autres phénomènes extrêmes, et ce sont également eux qui ont le [seuil de résistance](#) le plus faible à une perturbation donnée, mais il existe bien d'autres risques, et même pour les ouragans nous n'avons pas de garanties que nous ne serons pas un jour à égalité...

Ne peut-on avoir une bonne surprise ?

dernière version : septembre 2003

site del'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

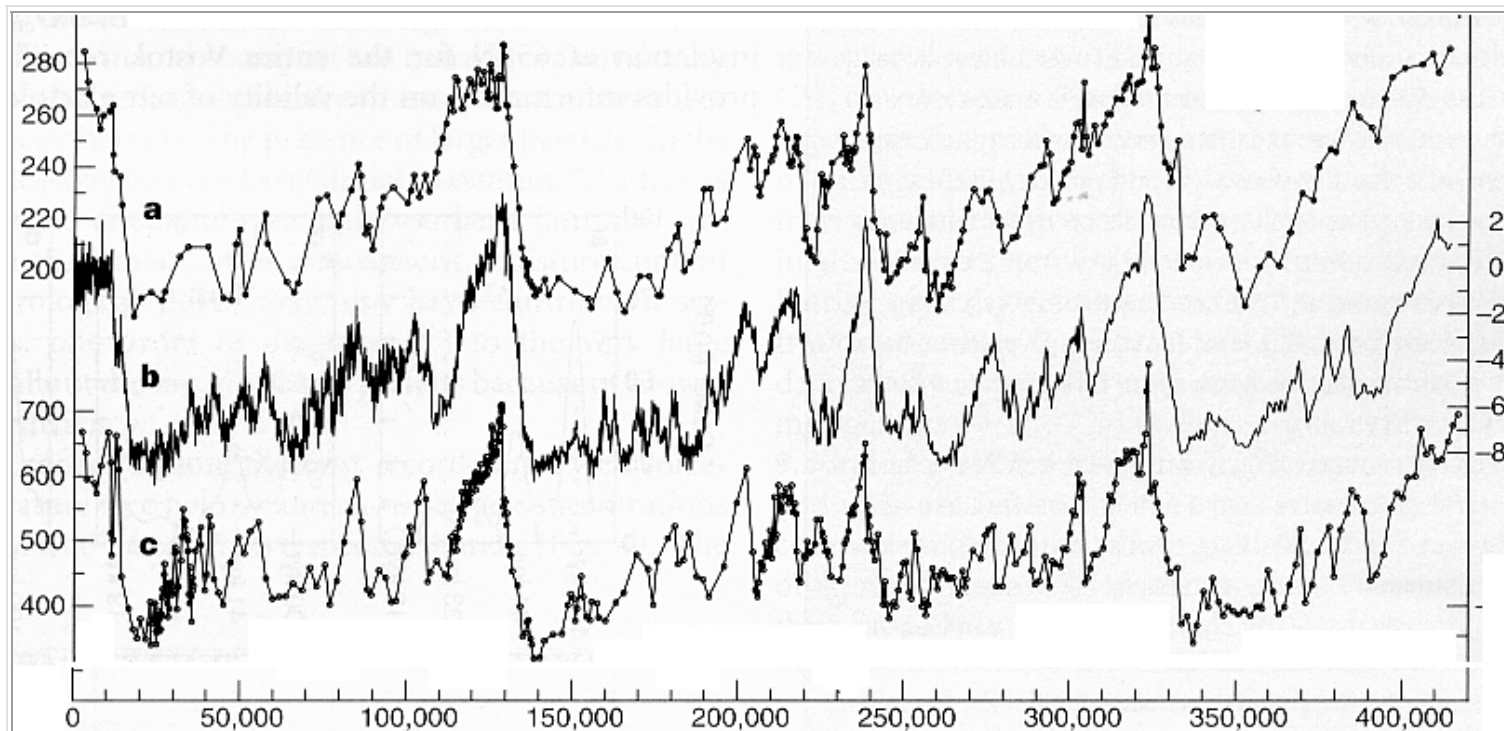
La "bonne surprise" serait en l'occurrence un phénomène **encore inconnu** qui "amortirait" le réchauffement supplémentaire provoqué par les [gaz à effet de serre](#) que nous émettons.

Que sait-on sur la question ?

Les études des ["archives" de l'Antarctique](#) font apparaître, sur de longues périodes, une étroite corrélation entre températures et concentration de principaux gaz "naturels" à effet de serre :

➤CO₂,

➤CH₄



Evolutions comparées sur les 400.000 dernières années (sauf le dernier siècle qui n'est pas représenté) :

- de la teneur atmosphérique en CO₂, en parties par million - en abrégé ppmv (courbe du haut ; échelle en haut sur l'axe vertical de gauche).
- de la teneur atmosphérique en méthane (CH₄) en parties par milliard (courbe du bas, échelle en bas sur l'axe vertical de gauche)
- de la différence par rapport à maintenant de la température moyenne au niveau du sol en Antarctique (qui est bon marqueur de la température terrestre moyenne, courbe du milieu, échelle sur l'axe vertical de

droite).

Les périodes glaciaires correspondent à des températures et concentrations en CO₂ basses, et les âges interglaciaires (comme celui que nous vivons actuellement) correspondent à des valeurs plus élevées de la température et du CO₂. On notera qu'entre un âge glaciaire et une période "chaude", la concentration en CO₂ ne varie que de 80 ppmv, ce qui est exactement la concentration supplémentaire que nous venons de mettre dans l'atmosphère en un siècle seulement.

Source : Petit & al., Nature, 1999

Il apparaît très clairement que ces courbes évoluent en parallèle. Avis à tous les pinailleurs : les incertitudes de mesure étant ce qu'elles sont, ce n'est pas la peine de faire remarquer que dans certains cas la température décroît un peu avant le CO₂ !

Cette évolution parallèle ne signifie pas en soi que les réchauffements du passé ont nécessité un effet de serre accru pour s'enclencher. La variabilité naturelle sur les longues périodes découle essentiellement de la modification de paramètres astronomiques : distance de la terre au soleil, inclinaison de la terre sur le plan de son orbite, etc, et des travaux récents (2003) suggèrent que la déglaciation d'il y a 250.000 ans a bien commencé par une modification de l'insolation qui a en retour influé sur la concentration en CO₂.

Mais imaginons maintenant qu'il existe un phénomène conduisant l'atmosphère à cesser de se réchauffer, ou à se réchauffer moins vite à partir d'un certain moment, avec une teneur en CO₂ qui continue d'augmenter. Alors on devrait observer une décorrélation entre la courbe du CO₂ - dans les parties ascendantes - et la courbe de température, c'est à dire que nous devrions voir, au même moment, le CO₂ monter pendant que la température ferait "autre chose" (devenir constante, descendre, ou simplement monter beaucoup plus doucement). Cela n'a manifestement pas été le cas dans le passé.

"Cette augmentation parallèle de la concentration en gaz carbonique et de la température signifie qu'il est illusoire de compter sur un phénomène encore inconnu et susceptible de diminuer l'amplitude du réchauffement par effet de serre" (citation de Michel

PETIT, ancien directeur général adjoint de l'[Ecole Polytechnique](#) en charge de la recherche, et ancien membre du bureau du [GIEC](#)).

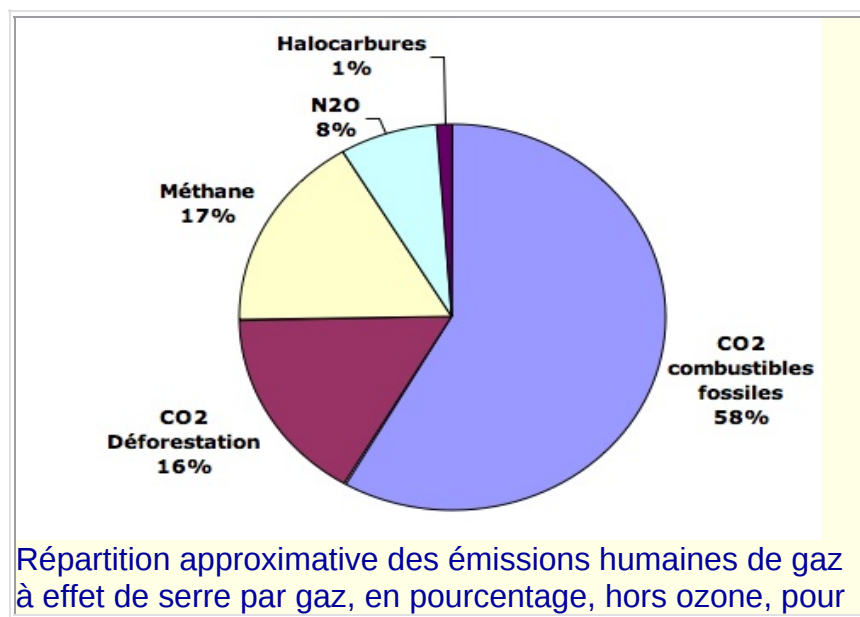
Faut-il craindre les hydrates de méthane ?

dernière version : mai 2005

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

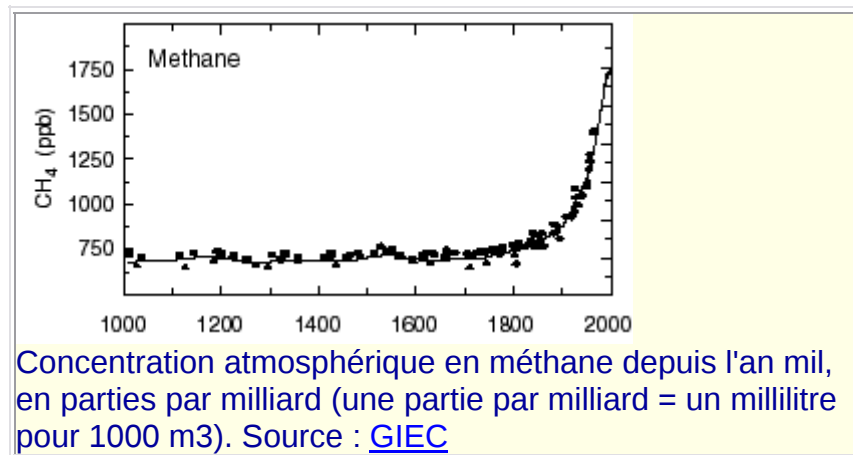
Pourquoi diantre se préoccuper du méthane, tout d'abord ?

Bien que "on" se focalise souvent sur le seul CO₂ quand "on" parle de [gaz à effet de serre](#), il n'en reste pas moins que le CO₂ n'est pas le seul de ces gaz à être mis dans l'atmosphère par l'homme : environ un tiers de nos émissions se compose d'autre chose, et dans cet "autre chose" une bonne moitié est due au méthane.



l'année 2000. Source : [GIEC](#)

Or le méthane, comme le CO_2 , est **aussi** un gaz "naturel" à effet de serre, en ce sens que, avec ou sans hommes, il y a du méthane dans l'atmosphère. Ce que nous avons fait durant les 2 siècles écoulés n'est pas d'avoir mis du méthane dans une atmosphère qui n'en comportait pas, mais d'avoir augmenté la quantité de méthane qui s'y trouvait.



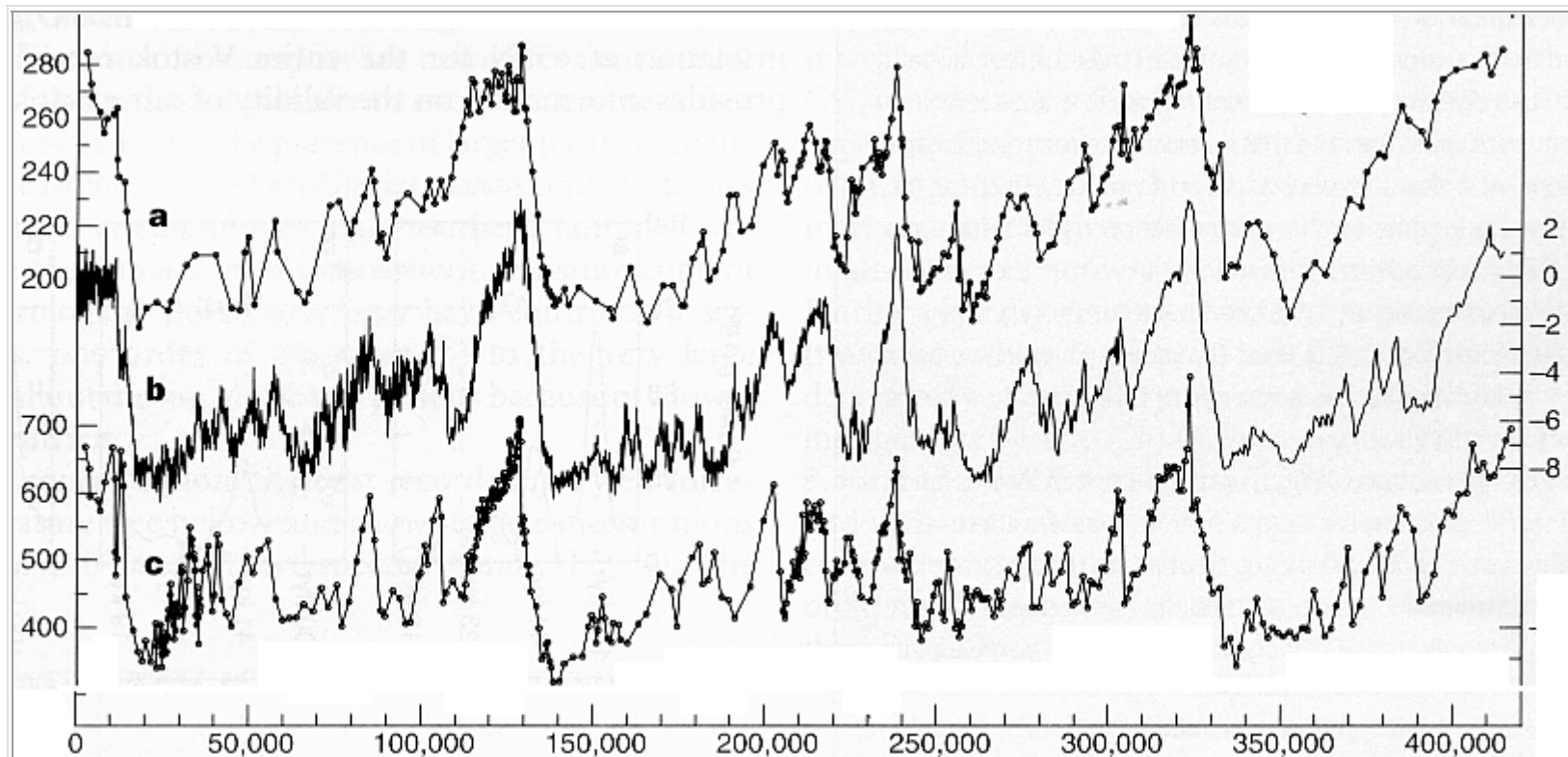
Dire qu'il y a naturellement du méthane dans l'atmosphère, c'est donc dire qu'il y a des sources de méthane qui ne viennent pas de l'homme. Et s'il y a de telles sources, il devient alors légitime de se demander si un début de changement climatique ne risque pas d'augmenter les émissions "naturelles" de méthane, [exactement comme cela pourrait être le cas avec le \$\text{CO}_2\$](#) . Accessoirement, dire que cette concentration était stable avant l'intervention des hommes, c'est aussi dire qu'il y a des mécanismes naturels d'épuration, sinon les sources naturelles feraient grimper la concentration jusqu'à l'infini, ce qui assurément n'est pas le cas !

La même question de l'influence du climat se pose donc aussi pour les "puits" naturels, où il est tout aussi légitime de se demander si un début de changement climatique affaiblit, renforce, ou ne modifie pas l'épuration de l'atmosphère en méthane. Nous pouvons commencer par la fin, et donner dès à présent la réponse à cette dernière question, car c'est la plus facile : un climat modifié n'aura hélas que peu d'influence sur l'oxydation lente du méthane dans l'atmosphère, qui est la manière dont il en est évacué.

D'où vient le méthane "naturel" et comment peut-il se transformer en hydrates ?

Pour qu'apparaisse du méthane, qui se compose uniquement de carbone et d'hydrogène (et dont la formule, mais ne le répétez à personne, est CH_4), il faut qu'un composé organique (un reste animal ou végétal) se décompose à l'abri de l'oxygène de l'air, en suivant une série de transformation permises par la présence de bactéries. En effet, si de l'oxygène passe par là, le carbone et l'hydrogène ont une telle envie de se jeter dessus (la chimie, c'est torride, hein !) qu'il se forme surtout du dioxyde de carbone et de l'eau, et non des hydrocarbures, dont le méthane est un des représentants.

De ce fait, les endroits "naturels" par excellence où il est possible de préserver des détritiques organiques de l'oxygène de l'air sont sous l'eau, et sous la terre. Un premier endroit qui correspond très bien au cahier des charges est un marécage, car les restes des plantes qui ont poussé au-dessus du marécage ou à proximité y tombent et se décomposent à l'abri de l'oxygène de l'air. Un feu follet, ce n'est rien d'autre que du méthane formé au fond des marécages qui s'enflamme spontanément au contact de l'oxygène de l'air. Et de fait, la teneur en méthane dans l'air, sur de longues périodes, est un bon marqueur de la pluviométrie globale, car les zones humides ont tendance à être plus étendues lorsque le climat est plus humide. Comme un climat plus humide est aussi un climat plus chaud, il est assez logique de retrouver une concentration atmosphérique en méthane plus élevée lorsque le climat est plus chaud, comme en attestent les carottages effectués dans la glace des pôles.



Evolutions comparées sur les 400.000 dernières années (sauf le dernier siècle qui n'est pas représenté) :

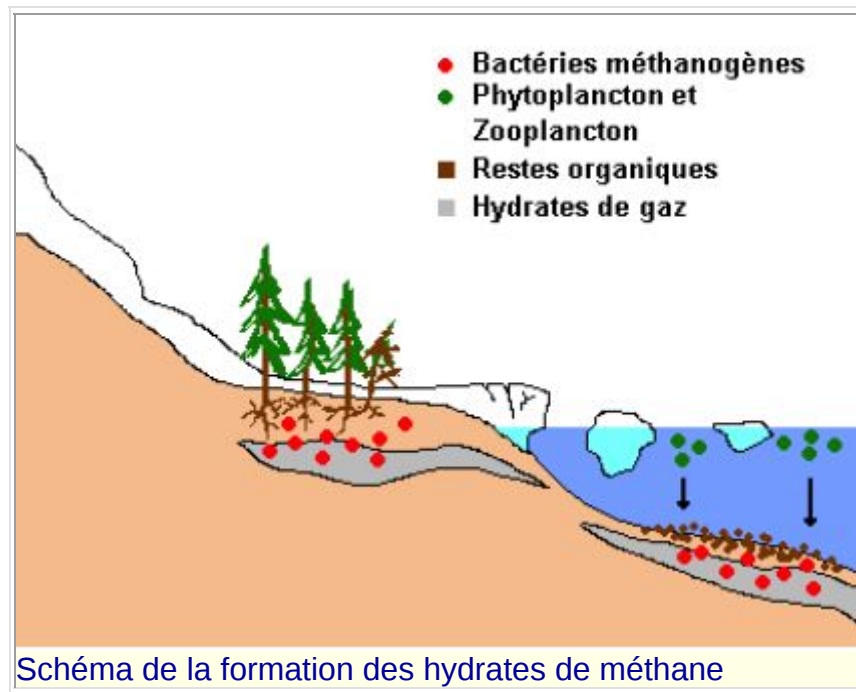
- de la teneur atmosphérique en CO₂, en parties par million - en abrégé ppmv (courbe du haut ; échelle en haut sur l'axe vertical de gauche).
- de la teneur atmosphérique en méthane (CH₄) en parties par milliard (courbe du bas, échelle en bas sur l'axe vertical de gauche)
- de la différence par rapport à maintenant de la température moyenne au niveau du sol en Antarctique, qui varie

deux fois plus vite que la température terrestre moyenne (courbe du milieu, échelle sur l'axe vertical de droite).

Les périodes glaciaires correspondent à des températures et concentrations en CO₂ basses, et les âges interglaciaires (comme celui que nous vivons actuellement) correspondent à des valeurs plus élevées de la température, du CO₂, et du méthane.

Source : Petit & al., Nature, 1999

Mais il n'y a pas que les marécages qui engendrent la formation de méthane : les sédiments océaniques et le sous-sol sont aussi des sources de méthane, dès lors que s'y trouvent des composés organiques, qui se décomposent plus ou moins lentement à l'abri de l'oxygène de l'air, sous l'effet de bactéries qui sont présentes un peu partout.

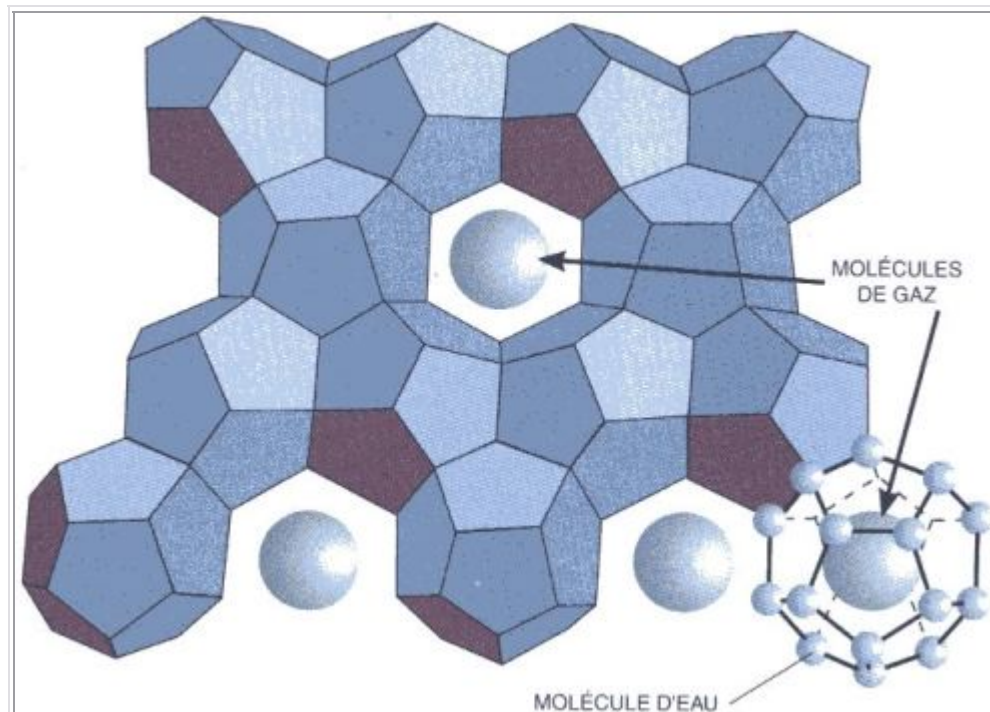


Une fois formé "naturellement", le méthane peut, ou non, partir rapidement dans l'atmosphère, selon son endroit d'apparition. S'il se forme dans des marécages, il va bien sûr immédiatement partir dans l'air (ce qui explique que la quantité "naturelle" de méthane dans l'air soit un bon marqueur de l'étendue des zones humides), mais pour les autres sources le méthane peut se former sans migrer ensuite dans l'atmosphère à bref délai : les réservoirs de gaz naturel ne sont rien d'autre que du "vieux" méthane qui ne s'est jamais échappé de terre après [sa formation dans le sous-sol](#).

Dans tous les cas de figure, bien sûr, ce méthane va chercher à migrer vers la surface, sous l'effet de la pression qui s'exerce sur lui, et qui est d'autant plus forte qu'il s'est formé profond dans les entrailles de la terre. Mais sa course éperdue vers la surface peut être arrêtée dans un certain nombre de cas de figure :

➤ s'il est "piégé" par une couche imperméable (en général il s'agit alors de la composante gazeuse d'un réservoir d'hydrocarbures, voir [formation du pétrole et du gaz](#)),

➤ s'il rencontre de l'eau, des fortes pressions, et qu'il ne fait pas trop chaud : il peut alors s'associer à de l'eau (pour cela il faut que l'eau "sature", c'est à dire que le méthane ne puisse plus se dissoudre dans l'eau, ce qui est ce qui se passe si la quantité de méthane est très petite) et former un cristal mixte d'eau et de méthane, qui s'appelle... un hydrate de méthane (on retrouve la même racine "hydrat" que ce que l'on peut lire sur les brumisateurs d'eau ou les crèmes... hydratantes pour les mains). A l'oeil, cela ressemble à de la glace (sauf que c'est de la glace qui brûle !).

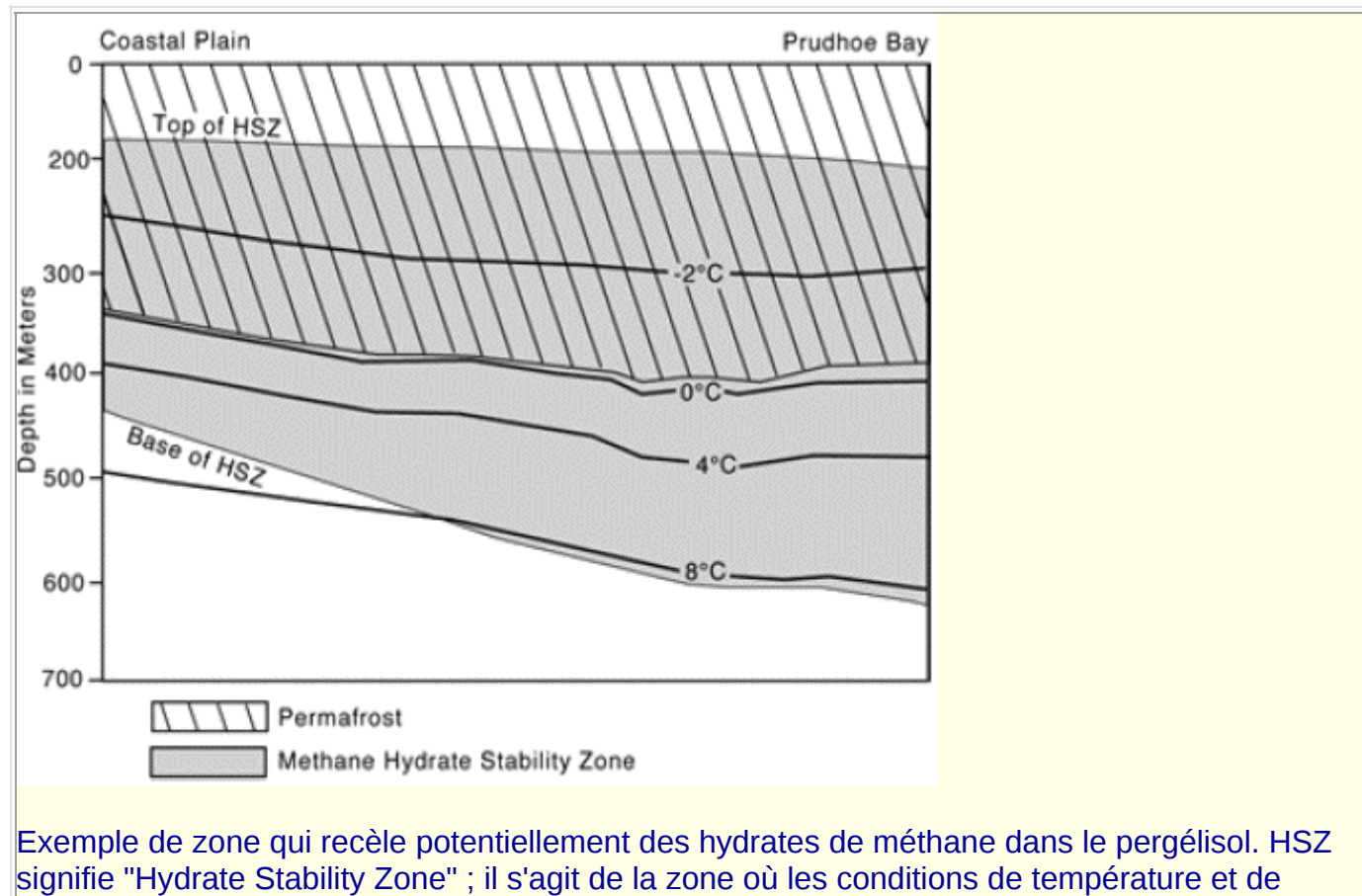


Représentation schématique d'un des types possibles d'hydrate de gaz : les molécules d'eau forment un cristal de glace (une structure solide, donc) composé de dodécaèdres réguliers, et l'intérieur de chaque dodécaèdre est occupé par une molécule de gaz retenue prisonnière. Si le gaz retenu prisonnier est du méthane, ce dernier représente à peu près 20% de l'ensemble en poids. La forme de la "boîte" - faite de molécules d'eau - qui retient le gaz prisonnier peut être un peu différente si le gaz a une molécule plus volumineuse (éthane, butane, etc).

Ce processus de transformation du méthane en hydrate peut notamment se produire :

- sous le sol gelé en permanence des hautes latitudes, qui s'appelle le pergélisol,
- dans les sédiments océaniques.

Sous le pergélisol, la zone où des hydrates sont susceptibles de se trouver est constituée d'une couche de quelques centaines de mètres d'épaisseur qui "démontre" à 200 ou 300 m sous la surface.



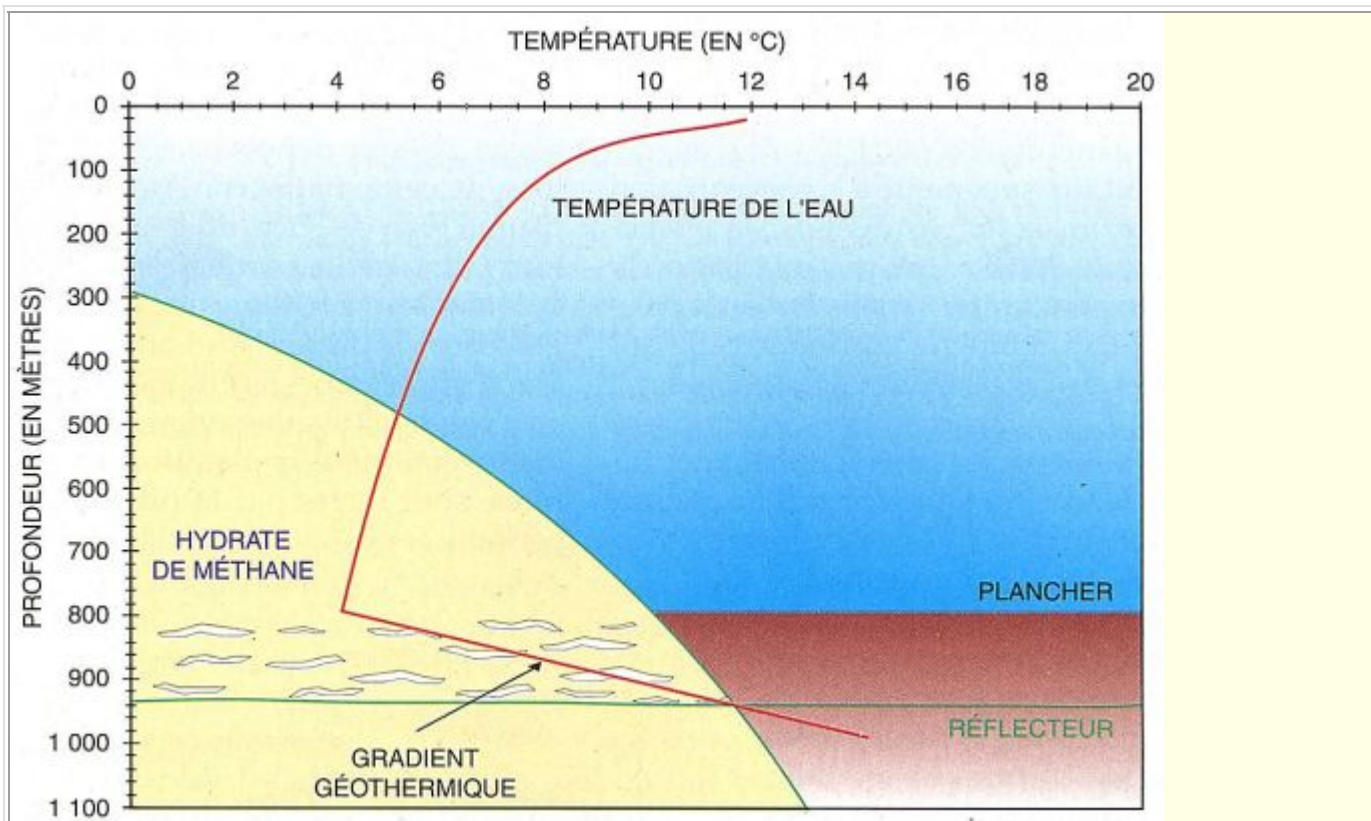
pression permettent de trouver des hydrates (voir détails plus bas). Le fait que la température remonte quand on s'enfonce dans le sous-sol est normal, et vient de la chaleur géothermique.
Source : M. D. Max, Hydrate resource for planetary habitation, 2001

Mais l'essentiel du méthane retenu "sous terre" sous forme d'hydrates semble se trouver dans les sédiments océaniques (si l'on fait exception des gisements de gaz naturel, bien sûr !). Ce méthane résulte, comme toujours, de la décomposition des débris animaux et végétaux (essentiellement du phytoplancton et du zooplancton) qui précipitent au fond des océans, où ils sont recouverts par les précipitations minérales (par exemple les débris des coquilles du plancton) puis entraînés vers les entrailles de la terre (voir [détails sur la page "formation du pétrole"](#)).

Combien d'hydrates sous nos pieds (et sous les nageoires des dauphins) ?

Maintenant que nous savons ce qu'est un hydrate de méthane et comment il se forme, vient la question de la quantité globale de ce composé sur terre, car c'est à partir de là que nous pourrions estimer les risques liés à un largage rapide de tout ou partie de ce méthane dans l'atmosphère. Or répondre à cette question à 100 euros (en fait à beaucoup plus comme nous allons le voir !) est tout sauf une affaire triviale. Une première chose que l'on peut faire pour progresser vers la lumière est "d'éliminer" les endroits où il ne peut pas y avoir d'hydrates, ou pas beaucoup, parce qu'un des ingrédients de la recette n'est pas disponible :

➤ il ne peut pas y en avoir si la pression est trop faible, ce qui exclut les trop faibles profondeurs d'eau, et en particulier l'essentiel des plateaux continentaux, sauf dans les régions polaires



Ce graphique permet d'expliquer quelles sont les zones où il va être *a priori* possible (ou impossible) de trouver des hydrates. Les diverses indications qui y sont représentées sont les suivantes :

- la courbe rouge intitulée "gradient géothermique" représente la température moyenne de l'eau sous la surface de l'océan, à des latitudes moyennes (en fait, quelle que soit la latitude, la température de l'eau à quelques centaines de mètres de profondeur est presque la même, à quelques degrés près), puis des premières centaines de mètres de sédiment. L'axe horizontal du haut donne la température, l'axe vertical de gauche la profondeur approximative. La température

commence par baisser à mesure que l'on plonge, en fait tant que l'on reste dans l'eau (car de moins en moins d'énergie solaire chauffe l'eau), puis se met à augmenter quand on descend dans le sol à cause de la chaleur géothermique, qui se dissipe mal en milieu solide, et permet donc une accumulation thermique quand on se rapproche de la source.

- la zone de stabilité potentielle des hydrates (zone colorée en jaune en bas à gauche), délimitée par une courbe donnant la température maximale qui permet l'apparition d'hydrates selon la profondeur (qui donne la pression : chaque 10 m d'eau en plus rajoute l'équivalent de la pression atmosphérique). Pour des raisons physiques (c'est de la thermodynamique), il est impossible que des hydrates puissent exister à droite de cette courbe. On peut lire cette dernière de deux manières, en se référant à la température (axe horizontal, en haut) ou à la profondeur (c'est-à-dire à la pression, axe vertical à gauche). Par exemple, pour une température de 4 °C, on peut trouver des hydrates à partir de 450 m de profondeur, mais au-dessus de cette valeur la pression n'est pas assez forte pour que ce cristal mixte puisse se former (il n'y a donc pas d'hydrates dans les régions du globe où la température de l'eau est supérieure à 4°C et la profondeur inférieure à 450 m). Lue dans "l'autre sens", la courbe qui délimite cette zone indique que, à 800 m de profondeur, on peut éventuellement trouver des hydrates tant que la température est inférieure à 10 °C, mais plus ensuite, etc.

Comme les hydrates ne peuvent rester que dans les sédiments (ce composé est moins dense que l'eau, donc si il apparaît dans l'eau ou qu'il y migre depuis les sédiments il remonte vers la surface en se désagrégeant), on peut donc en trouver entre le plancher océanique, et la profondeur à laquelle la température est suffisamment remontée pour que l'on "sorte" de la zone de stabilité. C'est ce qui arrive à la profondeur dans les sédiments matérialisée par l'intersection entre la courbe "gradient" et la limite de la zone jaune. La limite inférieure des hydrates, dans les analyses sismiques, engendre un écho particulier qui ressemble à celui du fond de l'océan, ce qui explique le terme "réflecteur" mentionné sur ce dessin.

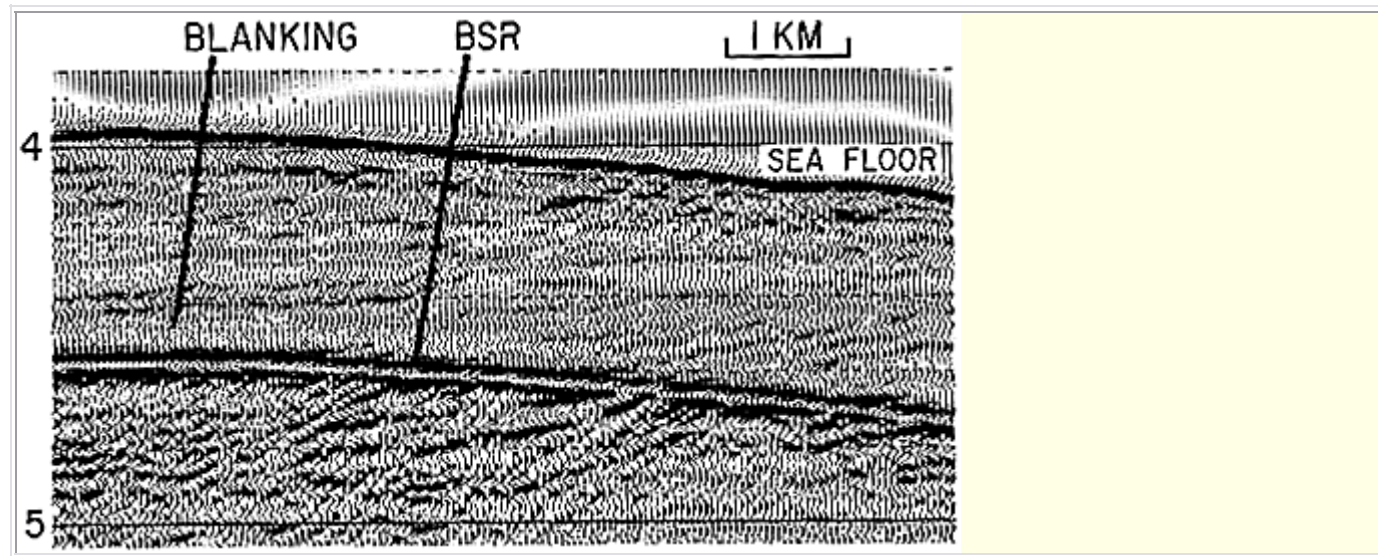
Source : USGS, 2005

➤ Il ne peut pas y en avoir beaucoup quand il y a de très grandes profondeurs d'eau, tout simplement parce que, à quelques exceptions près, il y a peu de vie marine dans l'océan du large, donc peu de plancton qui sédimente au-dessus des grandes

profondeurs d'eau, et donc peu de méthane dans le sédiment. Or le méthane doit avoir saturé l'eau dans lequel il est dissous pour que se forme de l'hydrate.

Il résulte de ce qui précède que, pour l'essentiel, les hydrates sont supposés être sur les talus continentaux, ces zones qui plongent des plateaux continentaux vers les abysses, et où la profondeur d'eau est de quelques centaines de mètres, sauf pour les zones polaires où il peut aussi y en avoir sur les plateaux continentaux (mais il faut quand même 300 mètres d'eau au moins comme le rappelle la figure du haut de l'encadré ci-dessus).

Quand il y a une suspicion de trouver des hydrates de méthane quelque part, comment faire pour en avoir le coeur net ? La première technique, peu précise mais utilisée pour "ratisser large", est la sismique. En effet, les hydrates ont une conductivité du signal sonore très largement supérieure à celle du sédiment "ordinaire", de telle sorte que quand un fond contient des hydrates en quantité notable l'écho de la zone contenant ces hydrates est plus faible que celui du reste des sédiments. En plus, le bas de cette zone (qui est le bas de la zone de stabilité des hydrates, à cause de la chaleur des entrailles de la terre, comme expliqué ci-dessus) engendre un écho très caractéristique qui ressemble fortement à celui du fonds de l'océan.

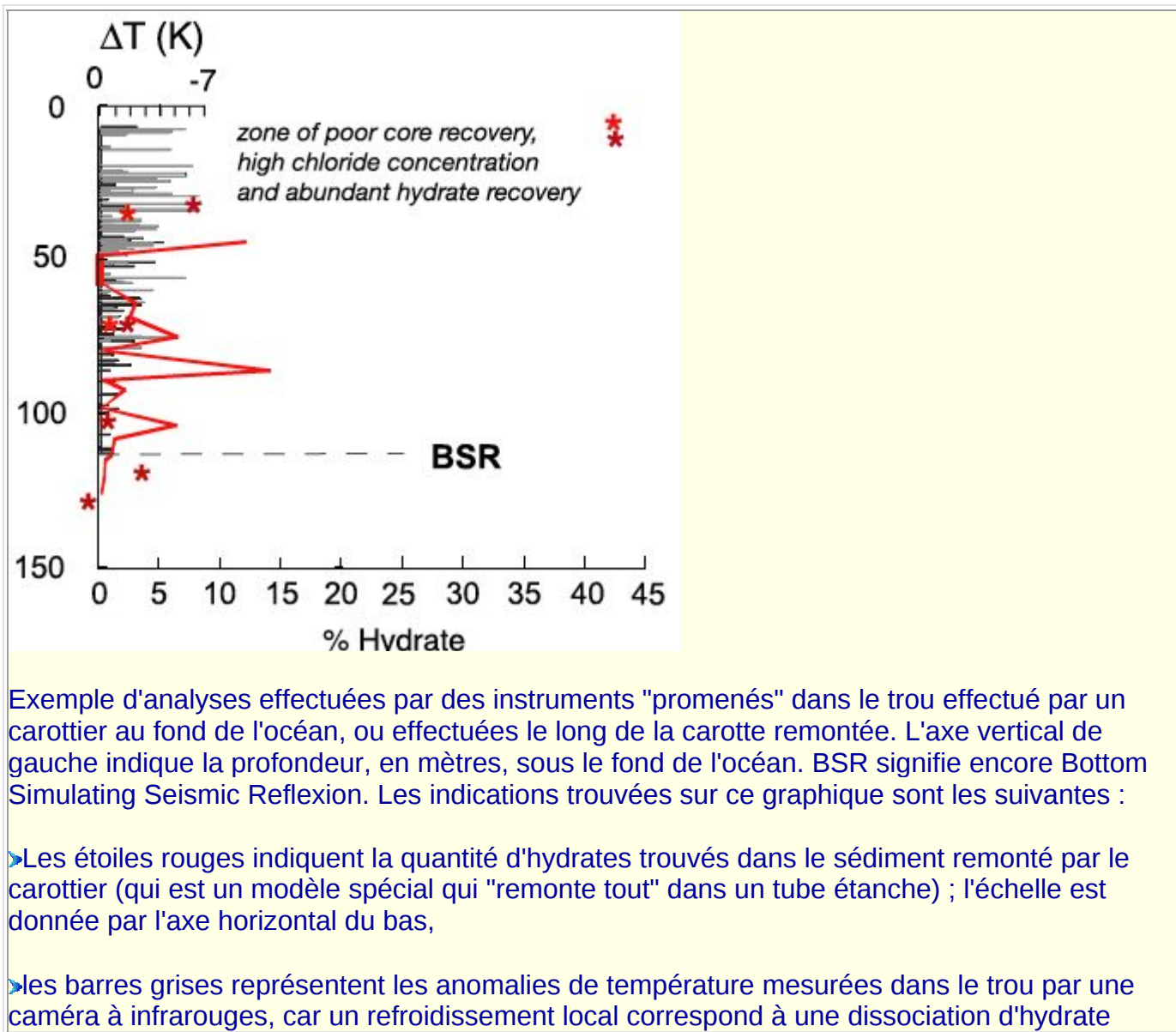


Exemple d'écho obtenu lors d'analyse sismique des fonds marins où la présence d'hydrates de méthane est suspectée. Deux "frontières" engendrent un écho quasiment identique : le plancher océanique (Sea Floor), et le bas de la zone de stabilité des hydrates (BSR, pour Bottom Simulating Seismic Reflexion, ou autrement dit "simulation de fond marin"). Les chiffres à gauche représentent le nombre de secondes qui séparent l'émission du signal de la réception de l'écho.

Source : USGS, 2005

Ensuite, quand la sismique a permis de repérer une zone qui pourrait bien contenir des hydrates, il faut faire des trous, comme souvent en géologie. Le trou en question, effectué au fond de l'océan, sert à 2 choses :

- il sert d'abord à prélever une carotte, bien sûr, dans laquelle on va chercher à voir si il y a ou s'il y a eu des hydrates. Mais les "hydratologues" partent avec un sérieux handicap par rapport à tous leurs collègues qui font des trous au fond de l'océan. En effet, pour ces derniers, ce qui est remonté à bord du bateau est identique à ce qui a été prélevé dans les fonds. Pour les hydrates, pas de chance ! comme la pression baisse en cours de remontée du sédiment, l'hydrate sort de sa zone de stabilité et se dissocie partiellement. De la sorte, ce que l'on voit dans la carotte remontée n'est pas identique à ce qui a été prélevé, et il n'est même pas facile de savoir "combien différente" la carotte était au fond de l'eau par rapport à ce que l'on voit sur le pont du bateau !
- le trou sert ensuite - ou en même temps qu'il est fait - à y promener des instruments divers, pour mesurer la résistivité du sédiment en place, l'émission d'infrarouges du même sédiment, et encore quelques autres petites babioles, qui fourniront autant d'indications précieuses pour savoir si des hydrates sont présents tout le long de la carotte, quand bien même ils auraient partiellement disparu quand le prélèvement sera remonté à bord du bateau.



(échelle du haut, K = kelvin),

► la ligne rouge représente la concentration en chlore dans l'eau contenue dans les pores du sédiment, et c'est un marqueur de la présence d'hydrates, car la formation de ces derniers s'accompagne le plus souvent de l'expulsion de sels chlorés qui se dissolvent ensuite dans l'eau.

Source : Anne Tréhu et al., *Joides Journal*, 2003

Comme on le voit, même en faisant des trous, savoir exactement combien il y a d'hydrates dans ce qui est prélevé n'est pas nécessairement trivial. En plus, les carottages seuls présentent une limitation importante dans un milieu solide : on peut très bien passer d'une concentration très forte à une concentration quasi-nulle en quelques kilomètres. C'est le cas pour à peu près tout minéral de métal, pour une veine de charbon, ou encore... pour la teneur en carbone du sol (qui peut varier d'un facteur 10 en parcourant moins d'un kilomètre à l'intérieur de la forêt de Fontainebleau !).

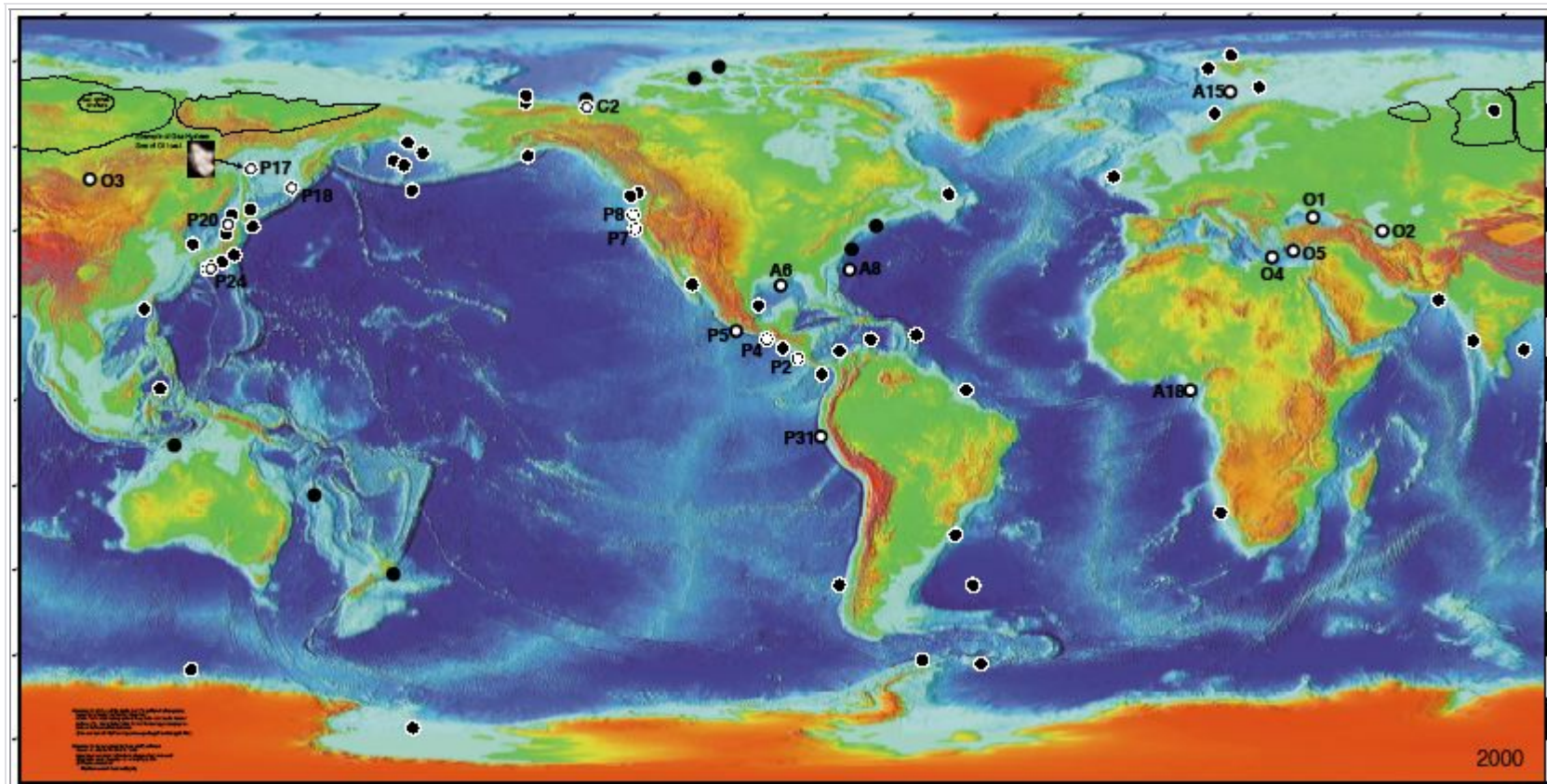
La technique appliquée pour les composés dissous dans un fluide (je fais quelques prélèvements, puis j'extrapole à l'ensemble du fluide) ne sont donc plus valables pour donner un ordre de grandeur pour des milieux solides. Cela étant, les carottages, même avec leurs défauts, sont quand même indispensables, car ils représentent le seul moyen d'aller voir ce qui se passe de près, outre qu'ils permettent d'étalonner les outils d'analyse sismique, lesquels peuvent par contre permettre d'estimer des concentrations moyennes sur de larges zones.

Il résulte de ce qui précède (phrase favorite des "matheux" !) que pour obtenir une bonne idée de la quantité d'hydrates stockée dans les fonds marins il faudrait idéalement forer tous les 10 mètres pour l'ensemble de l'océan, avec un carottier qui ne laisse rien échapper de ce qui est remonté. Comme les carottiers qui permettent de conserver l'intégralité du méthane présent dans le sédiment ne datent que de 2002, le lecteur comprendra facilement que nous n'y sommes pas encore.

Les évaluations publiées sur la quantité globale d'hydrates de méthane sur terre sont donc obtenues avec des informations parcellaires et doivent être considérées avec prudence. Comme la proportion d'hydrates dans les sédiments qui en contiennent peut varier du tout au tout, de quelques %, disséminés sous forme de petits filets ou nodules de quelques millimètres (cas de

figure le plus courant), à plusieurs dizaines de %, en quelques points d'accumulation particuliers, il est facile de comprendre que l'hypothèse retenue pour le taux moyen d'hydrates dans les sédiments peut faire varier les estimations globales d'un facteur 10 !

Une première synthèse possible de l'information disponible est tout simplement de cartographier les endroits où des hydrates ont été prélevés, ou sont probablement présents au vu des analyses effectuées (ci-dessous).



Régions du monde où la présence d'hydrates est avérée par des prélèvements (ronds vides) ou supposée par le biais d'analyses sismiques ou d'analyses de puits dans lesquelles des carottes ont été prélevées (ronds pleins).

Source Keith A. Kvenvolden and Thomas D. Lorenson, USGS, 2000

A partir des informations disponibles, des chercheurs de l'USGS (US Geologic Survey) ont évalué le stock d'hydrates sur terre à 10.000 milliards de tonnes de carbone (le carbone représente les 12/16^e du poids total du méthane), soit l'équivalent du double de [l'ensemble du gaz, du pétrole et du charbon extractibles de la planète](#). Encore une fois, il s'agit d'un résultat à considérer avec prudence, et si il y a peut-être là matière à quelques inquiétudes pour le climat, comme nous allons le voir, rien n'indique qu'une quantité quelconque de ces hydrates soit commercialement exploitable à l'avenir.

Pourquoi est-ce un problème pour le climat, tout ça ?

Comme le méthane est un [gaz à effet de serre](#), et que par ailleurs c'est le principal composant du gaz naturel (et donc qu'il brûle !), il y a deux évolutions liées à ces hydrates qui pourraient avoir une influence - négative - sur le climat :

➤ si ces hydrates sont commercialement exploitables, l'homme sera tenté d'y puiser une nouvelle source d'énergie carbonnée pour faire face à la diminution des autres ressources, [par exemple le pétrole](#), et le recours à ces hydrates comme source d'énergie permettra d'avoir des émissions croissantes de CO₂ pendant plus longtemps (en fait certains scénarii d'émission très intensifs en gaz [supposent nécessairement que ces hydrates seront exploités](#)),

➤ que ces hydrates soient commercialement exploitables ou pas, si la zone où ils se trouvent se réchauffe, ils vont cesser d'être stables, se dissocier, et le méthane s'échappera vers l'atmosphère, contribuant alors à accélérer le réchauffement climatique, puisque le méthane est un gaz à effet de serre.

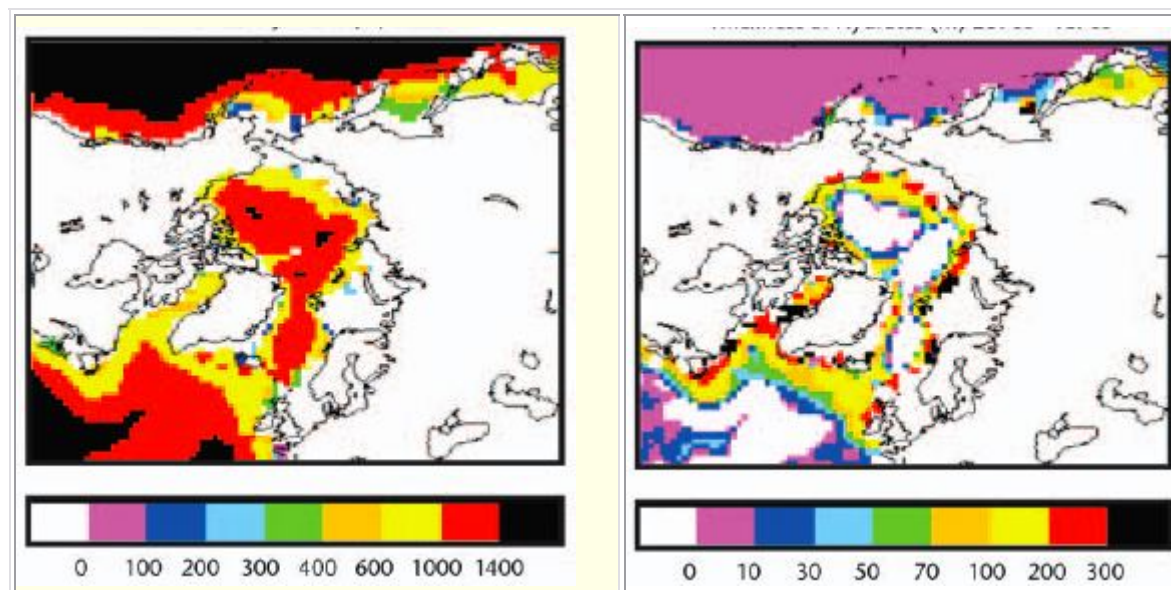
Le premier cas de figure suppose - bis repetita ! - que les hydrates seront commercialement exploitables à large échelle "un jour". Si leur concentration dans le sédiment ne dépasse pas quelques % en règle générale, rien n'est moins sûr, car il n'est en rien certain que l'on parviendra à trouver un moyen de "ratisser" un milieu solide (les sédiments océaniques) pour en extraire un composé présent à quelques % tout en dépensant moins d'énergie pour ce faire que celle contenue dans le méthane récolté.

Admettons cependant que les endroits où ces hydrates sont suffisamment concentrés soient en nombre tel qu'une bonne fraction de ce composé pourrait servir de source d'énergie. Pouvons nous donner une limite haute aux émissions qui en découleraient ? Si la quantité globale d'hydrates des fonds océaniques est de l'ordre de quelques milliards de tonnes de carbone (c'est une première hypothèse), et si quelques dizaines de % sont extractibles (c'est une deuxième hypothèse), nous nous trouvons là en présence d'une ressource du même ordre de grandeur que le charbon. Or rien qu'avec le charbon [nous avons déjà de quoi tellement changer le climat](#) qu'il serait sage d'en laisser la plus grande part sous terre (du charbon), [aux possibilités de séquestration près](#). Ajouter les hydrates au charbon, parce que ce dernier viendrait à manquer, c'est probablement l'assurance de largement dépasser 10°C de hausse de la température planétaire. Serait-ce seulement possible sans que la perturbation du climat ne se charge de nous "calmer" bien avant ?

Même si nous les laissons sous terre (ou sous l'océan), cependant, nous ne pouvons nous désintéresser de ces fichus hydrates. En effet, le réchauffement de la surface planétaire que nous avons mis en route, et qui va s'[amplifier de toute façon à l'avenir](#) (mais [plus ou moins en fonction de nos émissions](#), quand même !) va également se propager vers le fond de l'océan, certes très doucement, mais très réellement. Lorsque l'élévation de température se sera propagée jusqu'à la zone de stabilité des hydrates (il faut quand même de l'ordre du siècle), une partie de ceux-ci pourrait se désagréger, et libérer leur méthane qui partira dans l'atmosphère.

La fonte du pergélisol, enfin, pourrait conduire les continents à devenir aussi des sources de méthane : en se propageant lentement vers le bas, l'onde de chaleur engendrera la désagrégation d'une partie des hydrates éventuellement retenus dans le sous-sol des régions arctiques. Le haut de la fourchette, pour l'élévation de température qui pourrait résulter de la libération de méthane des hydrates, dépasse probablement 5 °C, et cela s'ajouterait, bien sûr, à la hausse résultant des émissions directes de l'humanité, et cela s'ajouterait aussi, bien sûr, à la hausse qui pourrait résulter du [déstockage rapide du carbone du sol des continents](#).

Bien sûr, tout cela n'est pas pour demain. Mais comment être sûr que ce n'est pas pour après-demain si nous continuons sur notre lancée ?



Épaisseur (simulée) de la couche recelant potentiellement des hydrates dans les sédiments dans le climat de 1870 (image de gauche) et épaisseur avec le climat simulé pour l'an 2100. La région du monde concernée est le pourtour du pôle Nord (l'image est centrée sur le pôle) : on reconnaît le Canada à Gauche et la Sibérie à droite. Le scénario d'émission n'est pas précisé dans le document présentant ce résultat. Par ailleurs les épaisseurs sont représentées avec les mêmes couleurs pour les deux images, bien que l'échelle ne soit pas la même !

Source : Stabilising climate to avoid dangerous climate change - a summary of relevant research at the Hadley Centre, Hadley Centre, 2005

Effet de serre et tabac : une petite comparaison pédagogique

décembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Il est assez difficile de faire comprendre que ce qui est en jeu, dans cette affaire de changement climatique, n'est pas de parvenir à un état particulier du monde, mais plutôt que quelque chose que nous n'avons jamais vu n'arrive pas. En général, nos actions ont deux grandes catégories d'objectifs :

- soit faire ce qu'il faut pour que quelque chose de connu se passe (gagner une quantité d'argent donnée, séduire quelqu'un, obtenir un travail donné, parvenir à courir aussi vite que quelqu'un d'autre, etc)
- soit faire ce qu'il faut pour que quelque chose de connu ne se passe pas (ralentir en voiture pour éviter un accident, ou encore empêcher un enfant de jouer avec les allumettes pour éviter un incendie, etc).

Mais "faire ce qu'il faut" pour que quelque chose de jamais vu, et pour lequel nous n'avons que des [simulations informatiques](#) comme référent, n'arrive pas, est bien plus difficile : comment savoir si nous y parvenons ou pas ? Il m'a semblé utile de proposer ici un parallèle entre changement climatique et tabac, car le tabac est probablement le risque connu qui permet le mieux de comprendre comment gérer la question du changement climatique :

- exactement comme le fumeur est fortement dépendant du tabac, notre civilisation est fortement dépendante des combustibles fossiles, qui sont à l'origine des émissions de [gaz à effet de serre](#) : il paraît tout aussi difficile au fumeur de se passer de la cigarette qu'il nous paraît aujourd'hui difficile de se passer des combustibles fossiles,
- les émissions de gaz à effet de serre ont un effet cumulatif, c'est-à-dire que leur effet s'additionne année après année, exactement comme l'effet de la fumée du tabac s'additionne année après année sur les poumons du fumeur,
- pour le tabac, il est plus facile de ne pas commencer à fumer que de s'arrêter ensuite : ne pas se mettre à la cigarette à l'adolescence demande un petit effort (on passe pour "ringard" après de ses copains(ines) qui fument déjà, etc), mais procure le gros bénéfice, ensuite, de n'avoir aucun des méfaits du tabac. De même, s'habituer comme jeune adulte à émettre le moins possible (en s'habituant à recourir le moins possible à la voiture, en se contentant d'une surface habitable plus modeste, en s'habituant à mettre un pull l'hiver plutôt que de monter le thermostat, en n'achetant pas tout ce qui est à vendre, et encore [un certain nombre d'autres choses](#)) est bien plus facile que de renoncer volontairement à tout cela une fois que nous avons adapté

notre vie quotidienne en acceptant des émissions importantes (ce qui est le cas avec 1 ou 2 voitures par ménage, 30 à 40 m² habitables à 20 ° C l'hiver par personne, et des achats à profusion dans les supermarchés),

➤ [l'arrêt des émissions ne permet pas de remettre instantanément les compteurs à zéro](#), tout comme, pendant de longues années, le fumeur qui a arrêté de fumer continue quand même à porter "l'héritage" de sa tabagie passée. En d'autres termes, arrêter de fumer ne remet pas instantanément la probabilité d'avoir un cancer ou un problème cardiaque au même niveau que pour un non fumeur. De même, l'arrêt des émissions ne permettra pas pour autant de supprimer instantanément la dérive climatique, qui [continuera quand même pendant des siècles de toute façon](#).

➤ mais l'arrêt du tabac conduira toujours à une situation moins risquée pour l'avenir, quelle qu'ait été la durée de la tabagie et la quantité de cigarettes consommées. De même, baisser les émissions de [gaz à effet de serre](#) sera toujours une bonne affaire pour le climat futur, quel que soit le moment où cette baisse interviendra. Tout comme pour le tabac, toutefois, plus nous baissons les émissions tôt, et plus les [risques futurs](#) sont faibles,

➤ dire que nous ne baisserons jamais les émissions n'a pas plus de sens que de dire qu'un fumeur n'arrêtera jamais de fumer : bien sûr qu'il arrêtera un jour, au plus tard le jour de sa mort ! De même, nos émissions finiront par baisser un jour, non point parce que le bien finira par triompher, mais tout simplement parce que le monde est fini, et que la quantité de gaz à effet de serre qui s'accumule dans l'atmosphère ne peut pas croître indéfiniment.

➤ arrêter de fumer demande un effort - éventuellement important - à court terme, en échange d'un bénéfice à moyen et long terme (diminution des dépenses, meilleure santé, moins de risque de mort précoce, moins de risque que ses propres enfants se mettent au tabac, etc). De même, [baisser volontairement les émissions demande un effort important](#), en échange d'une diminution des risques pour l'avenir. Dans les deux cas de figure, il faut agir pour que quelque chose n'arrive pas.

➤ pour le tabac comme pour le climat, quand les ennuis sont là il est trop tard pour faire machine arrière. Le fumeur qui se retrouve avec un cancer du poumon n'aura plus jamais deux poumons en bon état. Au mieux il y laissera une partie de son souffle et de son confort de vie, au pire il y laissera sa peau. De même, une fois que les ennuis du changement climatique seront là, nous ne pourrons plus faire machine arrière, même en baissant les émissions et la seule certitude que nous aurons alors est que [les ennuis iront en s'aggravant pendant un ou deux siècles au moins quoi que nous fassions](#).

➤il est impossible de dire à quel moment un fumeur aura franchi le seuil de l'irréversible pour avoir un gros ennui (cancer, infarctus, attaque cérébrale, etc) plus tard, et de même, il est impossible de déterminer scientifiquement à quel moment nous franchirons le seuil nous assurant d'une catastrophe climatique majeure dans un futur plus ou moins lointain.

➤lorsque nous ne parvenons pas à arrêter de fumer par manque de volonté personnelle, il paraît difficile de dire que "c'est la faute à l'industrie", ou "c'est la faute au gouvernement". Il paraît tout aussi discutable de considérer que l'industrie doit "faire ce qu'il faut" pour que le fumeur puisse disposer de cigarettes qui donneraient **exactement** les mêmes sensations quand on les fume sans qu'il y ait le moindre inconvénient, sans que ledit fumeur ait le moindre effort à faire de son côté pour avoir une conduite moins nocive pour sa santé.

Exactement de la même manière, nous ne pouvons pas reprocher aux pouvoirs publics notre manque de volonté personnelle pour moins prendre l'avion, moins conduire, moins chauffer nos logements ou avoir des maisons moins grandes, moins acheter de produits manufacturés, etc, et nous ne pouvons raisonnablement demander à l'industrie de porter seule l'effort de réduction des émissions, alors que sa contribution n'est que de 20 à 30% du total. Pour le changement climatique comme pour le tabac, une large partie de l'effort à fournir repose sur les épaules de vous et moi.

➤quand quelqu'un fume 10 cigarettes par jour, en passe d'en fumer 12, il me semble qu'il est mal venu de venir reprocher à quelqu'un qui en fume 2 de vouloir passer à 5, ou à quelqu'un qui en fume 20 qu'il l'empoisonne avec son tabagisme passif. De la même manière, nous autres européens qui émettons 2 à 3 tonnes équivalent carbone par personne et par an, en augmentation, nous ne pouvons reprocher aux pays qui émettent la quart de cette quantité de continuer à augmenter leurs émissions, ni faire des reproches aux pays qui émettent le double par habitant quand nous sommes déjà très au-dessus de ce qui est "durable".

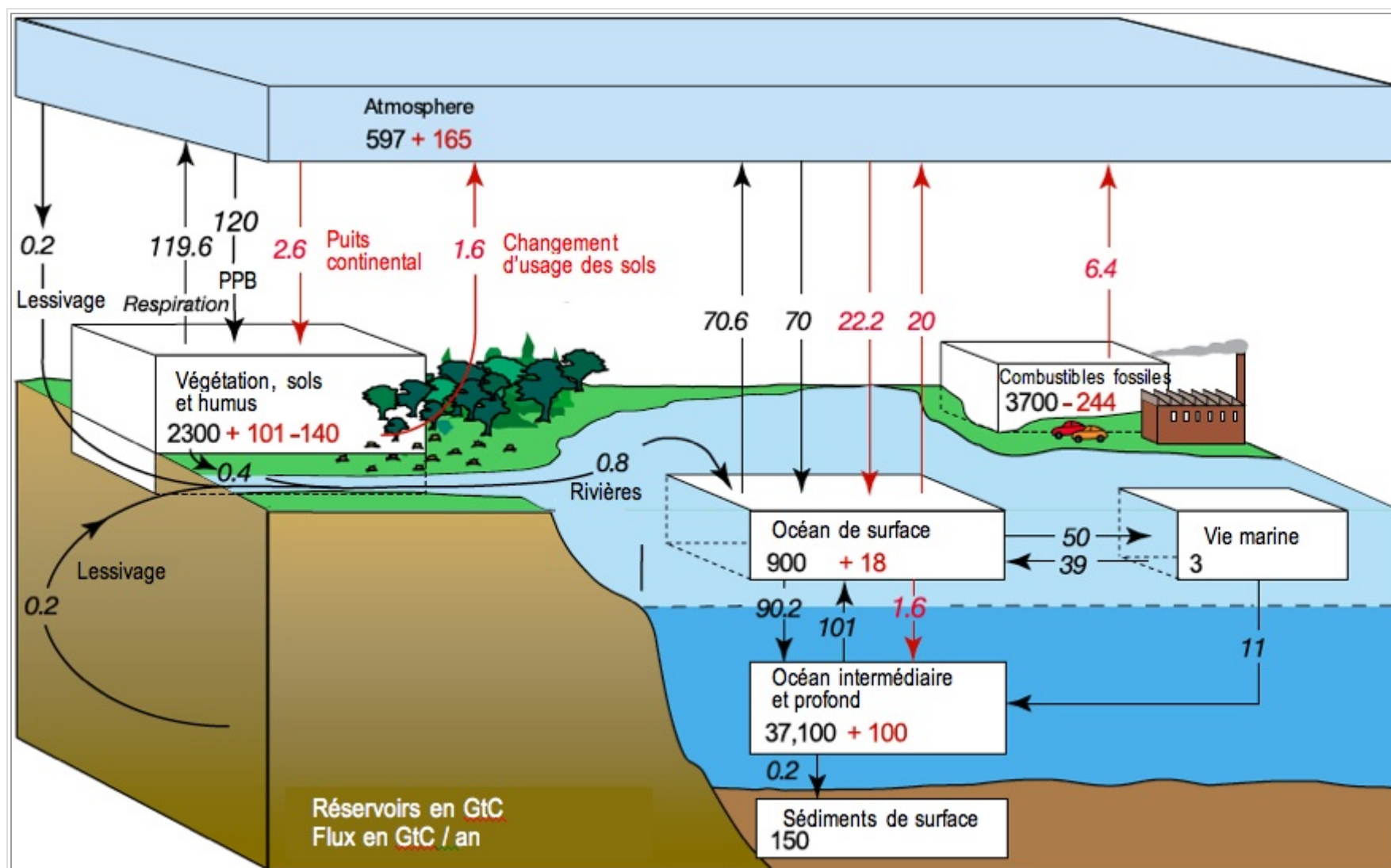
➤le parallèle vaut aussi pour les solutions : ainsi, la dissuasion par les prix est très efficace dans les deux cas de figure, pour le tabac comme pour l'énergie fossile. Plus c'est cher, et moins nous en consommons ! Quiconque approuve les hausses du tabac pour empêcher les adolescents de fumer devrait aussi approuver une hausse continue du prix de l'énergie fossile, pour éviter une trop grande perturbation du climat futur pour ces mêmes adolescents....

Les puits de carbone ne vont-ils pas absorber le surplus de CO₂ ?

Dernière version : août 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

L'homme n'est bien entendu pas la seule source de CO₂ à alimenter l'atmosphère : de manière parfaitement naturelle, et ce depuis des milliards d'années, l'atmosphère "échange" du carbone avec d'autres stocks de carbone existants sur terre, contenus dans des réservoirs où ce carbone est présent sous une forme ou sous une autre.



Représentation des stocks de carbone sur Terre susceptibles d'alimenter des échanges à l'échelle du siècle (ce diagramme

ne représente donc pas le carbone contenu dans le calcaire, qui est de très loin le stock le plus important de la planète), et des flux annuels de carbone, le tout en milliards de tonnes de carbone (notées GtC).

Les flux en noir représentent les échanges "naturels", autrement dit ceux qui étaient les seuls à exister avant le début de l'ère industrielle, et les valeurs en noir pour les stocks représentent l'état (reconstitué) de 1750, avant le début des activités industrielles. Les flux en rouge représentent l'effet des activités humaines (flux renforcés, diminués, ou créés), pour la moyenne de la décennie 1990, et les valeurs en rouge pour les stocks représentent la variation de 1750 à 1994.

Ce diagramme signifie par exemple (les explications complémentaires sont plus bas dans le reste de la page) :

- que les sédiments de surface (la fraction des sédiments océaniques qui est au contact de l'eau) contiennent 150 milliards de tonnes de carbone, montant inchangé depuis le début des activités industrielles,
- que l'océan intermédiaire et profond contenait 37.100 milliards de tonnes de carbone en 1750, montant qui a augmenté de 100 milliards de tonnes de carbone depuis le début des activités industrielles,
- que les écosystèmes continentaux contenaient 2.300 milliards de tonnes de carbone en 1750 (dans les plantes, les sols et l'humus), montant qui a augmenté de 101 milliards de tonnes de carbone depuis le début des activités industrielles au titre de l'accroissement de la productivité des plantes, mais qui a baissé de 140 milliards de tonnes de carbone sur la même durée à cause de la déforestation et éventuellement du déstockage d'une partie du carbone du sol,
- que l'atmosphère contenait 597 milliards de tonnes de carbone en 1750, montant qui a augmenté de 165 milliards de tonnes de carbone depuis le début des activités industrielles suite aux émissions de CO₂,
- que le stock de combustibles fossiles (tout agrégé : pétroles, gaz, charbons) valait environ 3700 milliards de tonnes de carbone en 1750 - avant que l'on ne commence à piocher dedans - et que fin 1994 nous avions "déstocké" (en fait brûlé, donc avec transfert de CO₂ à l'atmosphère) environ 244 milliards de tonnes de carbone (pour info entre 1994 et 2005 cette valeur a augmenté de 30%).

Il est important de noter que les échanges "naturels" - ou encore pré-industriels - entre l'atmosphère et le reste de la planète sont/étaient équilibrés : dans cette situation, il "monte" 70,6 milliards de tonnes par an des océans et 119,6 GtC par an des écosystèmes continentaux (respiration des plantes, animaux et micro-organismes décomposant les débris

organiques), soit 190,2 Gt , et il en "descend" 70 (vers les océans), 120 vers les sols (photosynthèse), et 0,2 sous forme de "lessivage" (le CO₂ atmosphérique se dissout dans l'eau de pluie), soit 190,2 également. Des échanges préindustriels équilibrés sont bien évidemment la contrepartie logique d'une teneur atmosphérique en CO₂ qui est restée constante sur plusieurs milliers d'années avant 1750.

NB1 : les émissions de CO₂ d'origine fossile, qui sont à 6,5 milliards de tonnes de carbone - environ 24 milliards de tonnes de CO₂ - par an sur ce diagramme (ce qui correspond à la moyenne de la décennie 1990) sont désormais de presque 8 milliards de tonnes de carbone par an - quasiment 29 milliards de tonnes de CO₂.

NB2 : PPB signifie Productivité Primaire Brute (il s'agit du produit brut de la photosynthèse).

Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007.

Comme on le voit dans le diagramme ci-dessus, ces réservoirs et ces échanges sont nombreux et variés. Le plus souvent, que ce soit dans les stocks ou les flux représentés, le carbone n'est pas présent à l'état pur, mais associé à d'autres atomes (dans les combustibles fossiles il est associé à de l'hydrogène pour former des hydrocarbures, dans l'océans il est associé à de l'oxygène et éventuellement de l'hydrogène pour former des ions carbonate et bicarbonate, dans les émissions des océans ou des écosystèmes continentaux il est associé à de l'oxygène pour faire du CO₂ ou à de l'hydrogène pour former du méthane (et encore d'autres composés très minoritaires en masse), l'essentiel du stock atmosphérique de carbone se trouve dans le CO₂, etc.

Toutefois, dans ce genre de diagramme, on ne mentionne que le poids du carbone présent dans les stocks ou échangés dans les flux, pour pouvoir faire facilement des comparaisons et des correspondances (c'est le même principe que celui de la conversion en "consommation d'alcool pur" lorsque l'on regarde la consommation par pays de boissons alcoolisées). L'ensemble de ces flux s'appelle le "cycle du carbone", et la plus grosse partie de ces échanges sont "naturels". La planète ne nous a pas attendus pour avoir un cycle du carbone ! Pour autant, il est bien évidemment illégitime de déclarer d'entrée de jeu que l'influence humaine est négligeable avant même d'avoir regardé les chiffres en détail.

Pour les échanges dits "naturels" la situation se présente comme suit :

➤ 120 Gt - dans chaque sens - sont échangés chaque année entre les écosystèmes continentaux et l'atmosphère. Le flux descendant est bien entendu celui de la photosynthèse, et ce CO₂ consommé par les végétaux se retrouve dans le stock de carbone des écosystèmes continentaux. Le flux montant est double :

➤ un premier terme (qui fait environ la moitié des 119,6 GtC/an) provient de la respiration des plantes (qui respirent, si si !) et animaux "macroscopiques",

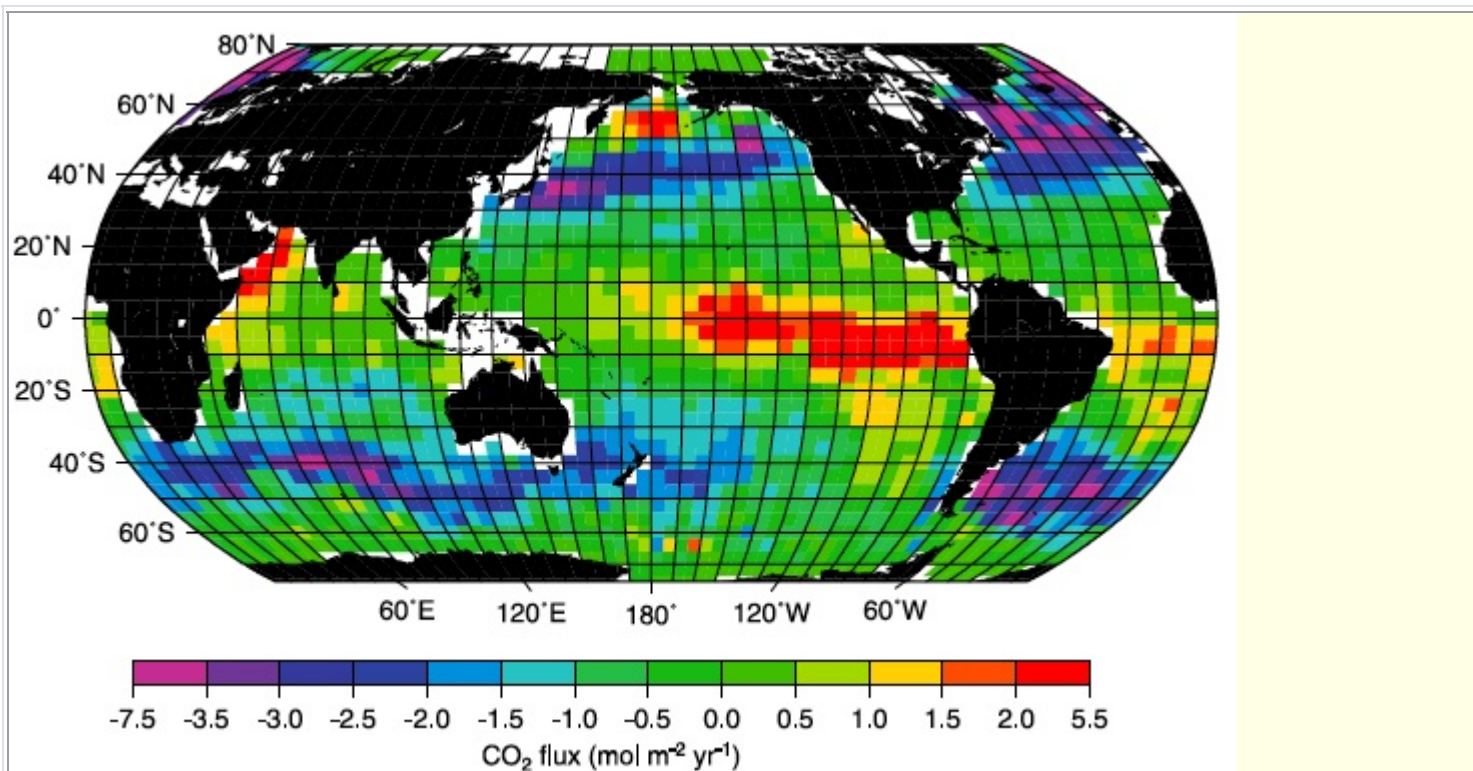
➤ le deuxième terme provient de la respiration des organismes "microscopiques", en particulier des micro-organismes qui décomposent les végétaux morts (c'est pourquoi on dit parfois que la moitié du flux montant provient de la décomposition des organismes morts). Ce flux est pour partie saisonnier, car il est notamment nourri par la décomposition des feuilles tombées à l'automne,

➤ 70 Gt - dans chaque sens aussi - le sont entre l'océan de surface et l'atmosphère. Ici, point de vie pour alimenter les échanges : la cause est purement physique. Il se trouve que l'eau chaude dissout moins bien le CO₂ que l'eau froide, et donc quand on chauffe de l'eau qui contenait du CO₂ à sa limite de capacité pour la température de départ (on parle d'eau saturée en CO₂) elle ne va pas pouvoir "garder" tout ce CO₂ dissous et va en cracher une partie dans l'air. Inversement, quand l'eau se refroidit, elle augmente sa capacité de stockage en CO₂ dissous et elle va donc pouvoir "pomper" du CO₂ supplémentaire en provenance de l'atmosphère. Cette propriété que l'eau a de disposer d'une capacité de stockage du CO₂ qui varie avec la température fournit l'explication aux échanges avec l'océan :

➤ là où l'eau océanique est en train de se refroidir, le flux de CO₂ va de l'atmosphère vers l'océan ; en pratique ce sont donc les courants océaniques de surface en provenance des tropiques et à destination des pôles (car l'eau était chaude au départ et se refroidit) qui "pompent" le CO₂ atmosphérique,

➤ là où l'eau océanique est en train de se réchauffer, c'est l'inverse : le CO₂ qui devient "en excès" dans de l'eau saturée est émis vers l'atmosphère,

➤ la boucle se boucle à cause de la [circulation océanique globale](#) : le CO₂ émis par l'eau qui se réchauffe a bien évidemment été absorbé à un moment où cette même eau était en train de se refroidir, "ailleurs sur terre", au sein d'un autre courant.



Répartition géographique des échanges mensuels de CO₂ entre l'océan et l'atmosphère, calculée à partir de 41 ans de mesures du pH de l'eau de surface et de la vitesse du vent. Les cases jaune / rouge correspondent à un flux "montant" vers l'atmosphère et les cases vert / bleu à un flux descendant.

Il est facile de constater que le flux montant prend essentiellement place dans le pacifique Est, là où les eaux froides et profondes de la circulation océanique mondiale montent à la surface (upwelling) et se réchauffent, largant alors du CO₂.

A l'inverse, les courants de surface où l'eau se refroidit (dont le Gulf Stream, à droite de la planisphère)

sont des lieux où le flux est "descendant".

Source : [GIEC](#), 4^e rapport d'évaluation, 2007.

➤ 40 à 50 Gt - dans chaque sens - sont enfin échangés entre l'océan de surface et la vie marine (laquelle, soit dit en passant, représente un stock de carbone ridicule : 3 milliards de tonnes, quand la vie terrestre en fait 1500 !). Le principe est le même que sur terre : les organismes marins végétaux (algues et phytoplancton, essentiellement) consomment du CO₂ - dissous dans l'eau, certes - ce qui constitue un puits. Ces organismes sont ensuite soit mangés (vivants ou morts) par des animaux qui respirent (première source de CO₂), soit meurent sans être mangés. Dans ce dernier cas, leurs restes sont alors pour une petite partie entraînés vers les fonds marins, où ils sédimentent et/ou alimentent une vie anaérobie (ce qui produit alors du méthane), et pour l'essentiel décomposés par des micro-organismes aérobies dont la respiration restitue du CO₂.

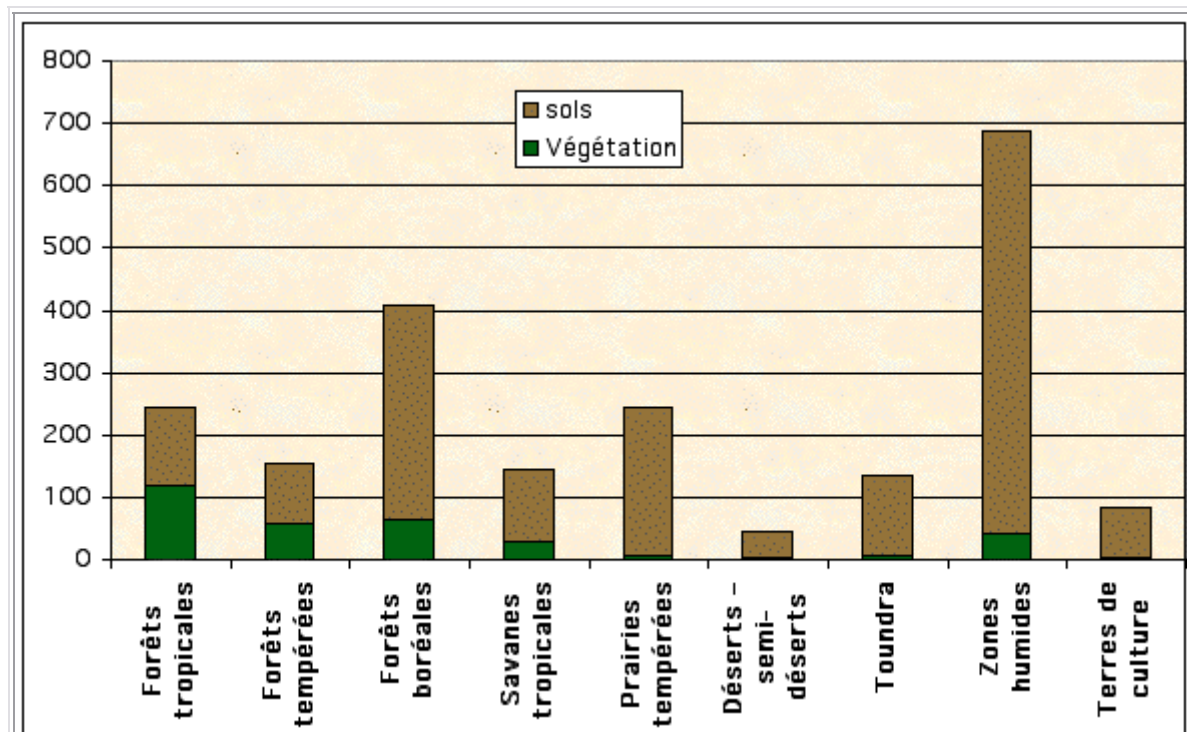
Si l'homme n'a pas créé le cycle du carbone, il y a rajouté "ses" échanges qui font toute la différence dans le cadre du changement climatique. Il y a d'abord des rajouts directs :

➤ l'émission dans l'atmosphère d'environ 6,5 Gt par an en moyenne sur la décennie 1990 - désormais nous sommes à presque 8 - due à la combustion des [énergies fossiles](#) et à la production de ciment,

➤ 1,5 Gt environ due à la déforestation. L'essentiel de cette dernière est due à du défrichement pour obtenir de nouvelles terres à vocation agricoles (champs ou pâtures), ce qui engendre deux flux de CO₂ :

➤ L'essentiel du bois coupé en pareil cas est brûlé (et souvent le défrichement se fait par le feu), ce qui concourt directement à des émissions de CO₂,

➤ Une fois que la terre est utilisée comme champ, le labourage expose plus fréquemment l'humus à l'air (et plus précisément à l'oxygène de l'air), et cela accélère la décomposition de ce dernier (en fait cela augmente la respiration des micro-organismes aérobies, ce qui n'est pas très étonnant !), avec pour résultat que la teneur en carbone d'un sol cultivé est bien plus basse que celle d'un sol de forêt, ou même de prairie (qui n'est pas labouré), la différence étant alors partie dans l'atmosphère.



Contenus approximatifs en carbone par hectare de divers types d'écosystèmes. Il est facile de constater que le contenu en carbone des terres de culture est bien plus bas que celui des divers types de forêt.

Source : [GIEC](#), 2001

➤ Dans le jargon "effetdeserrien", les émissions liées à la déforestation sont souvent désignées sous le vocable "changement d'usage des sols" : on change l'usage d'un sol quand il ne sert plus à héberger une forêt mais à permettre des pratiques agricoles. Il arrive aussi que l'on discrimine les feux de forêt ainsi que les feux "souterrains" de tourbe qui conduisent, comme les feux du défrichement, à des émissions nettes de CO₂ (par contre cette catégorie ne comprend pas les feux persistants de mine de charbon, qui peuvent durer très longtemps sans pouvoir être arrêtés).

Il est important de savoir que le flux lié à la déforestation est connu à ± 1 Gt près : c'est une incertitude très significative pour des flux qui sont du même ordre de grandeur !

Ces flux directs supplémentaires ont engendré des flux indirects (en rouge sur le diagramme du haut) qui sont provoqués par une modification de l'équilibre général. Ces premiers flux indirects concernent l'océan :

➤ [l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂](#) a créé un flux supplémentaire vers l'océan de surface (22,2 milliards de tonnes de carbone par an actuellement) : comme indiqué ci-dessus, la physique est ainsi faite que la proportion de CO₂ dans l'air tend à s'équilibrer avec la "proportion de CO₂ dans l'eau" (les physiciens parlent d'équilibrage des pressions partielles), et donc plus de CO₂ dans l'air augmente - toutes choses égales par ailleurs - le flux descendant vers l'océan.

➤ mais par ailleurs ce CO₂ supplémentaire dans l'air engendre un [réchauffement de la surface planétaire](#), qui s'appliquera aussi à l'océan, et là les choses vont aller dans l'autre sens. Comme nous l'avons vu plus haut, l'eau chaude dissout en effet moins bien le CO₂ que l'eau froide, et donc un réchauffement de l'océan de surface va globalement augmenter les émissions et affaiblir la dissolution, avec un effet global qui correspond à un flux montant de 22 milliards de tonnes par an,

➤ enfin à cause de la circulation océanique verticale, qui [prend précisément place là où l'eau est très froide](#) (donc très "chargée" en CO₂) une partie du surplus de CO₂ absorbé par l'océan de surface est "injecté" dans l'océan profond (1,6 milliard de tonnes par an actuellement). Ces [courants thermohalins](#) entraînent le carbone des eaux de surface vers les fonds marins, soit sous forme de carbone dissous, soit sous forme de restes d'animaux qui sédimentent, le soustrayant alors à l'atmosphère pour une durée assez longue. Le carbone dissous sera ramené vers la surface au bout de quelques siècles, au moment de la résurgence en surface des eaux entraînées vers les profondeurs, par contre les sédiments océaniques constituent un stock à rotation plus longue : il faut quelques dizaines de millions d'années avant que le carbone qu'ils contiennent ne soit recyclé par le volcanisme, lorsque la tectonique des plaques (la lente dérive des continents à la surface de la terre) amènera le sédiment au-dessus d'une zone volcanique.

Pour les écosystèmes continentaux, il va y avoir là aussi des effets (indirects) contrastés au surplus de CO₂ atmosphérique :

➤ l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'air permet une photosynthèse plus active (du reste l'enrichissement de l'air en CO₂ est un procédé utilisé pour accélérer la pousse dans les serres à tomate, preuve que ça fonctionne !), donc une plus grande activité du puits continental,

➤ mais l'élévation de la température augmente la vitesse de décomposition de l'humus du sol, et donc le flux "montant" de CO₂ augmente aussi. Aujourd'hui, il semblerait bien que l'effet "puits" l'emporte sur l'effet "source", le résultat global étant un flux descendant de 2,6 GtC par an dans le diagramme du haut de la page, mais une vraie question est de savoir si cela va durer à l'avenir (voir ci-dessous).

Si nous tentons un bilan provisoire de cette affaire, nous avons donc des émissions directes liées aux combustibles fossiles (environ 6,4 GtC/an sur ce graphique, quasiment 8 aujourd'hui) et à la déforestation (environ 1,6 GtC/an sur ce graphique, quasiment 2,5 aujourd'hui) qui engendrent en réponse un "supplément" d'absorption de l'océan de 2,2 GtC/an environ, et un supplément d'absorption de 2,6 GtC/an des écosystèmes continentaux. Tout collégien en déduira que $6,4 + 1,6 - 2,2 - 2,6 = 3,2$, ou encore que l'atmosphère augmente chaque année son stock de CO₂ d'un petit 50% de nos émissions directes. C'est la raison qui explique pourquoi il faut diviser les émissions de CO₂ par 2 au moins (pour que nos émissions n'excèdent pas la capacité des puits), ce qui finira par arriver de toute façon, la seule question étant quand et comment).

Comment tout cela pourrait-il évoluer à l'avenir ?

➤ En ce qui concerne l'océan, sa capacité d'absorption continuera à augmenter avec la teneur de l'atmosphère en CO₂, mais à diminuer avec une température de surface qui augmente. Un processus pourrait rendre la diminution particulièrement marquée : la stratification de l'océan, qui correspond à la situation où la circulation thermohaline [s'affaiblit brusquement en réponse au réchauffement de l'eau de surface](#). L'océan profond cesse alors de communiquer avec l'océan de surface, et ce dernier, qui ne peut plus profiter d'un courant descendant pour "envoyer plus bas" le CO₂ absorbé dans l'atmosphère, va saturer beaucoup plus vite en CO₂ (et donc être un puits moins efficace).

➤ En ce qui concerne les écosystèmes terrestres, l'évolution future [dépendra de nombreux paramètres](#), mais pour résumer on peut dire que :

- ▶ au début, et la photosynthèse et la décomposition croissent de concert, car un climat plus chaud et [globalement plus humide](#) favorise à la fois la croissance des végétaux et la prolifération des micro-organismes,
- ▶ mais le flux descendant (la photosynthèse) dépend en quasi-totalité d'organismes évolués (les plantes), qui souffriront d'un changement climatique majeur, alors que le flux montant est pour moitié environ le résultat de la respiration de micro-organismes qui sont globalement bien plus résistants à un changement de conditions (si ils ont toujours à manger, mais là aussi il y aura encore des végétaux morts à décomposer bien après que les derniers végétaux vivants aient disparu !). Au delà d'un certain degré de changement climatique, le bilan qui est aujourd'hui celui d'une séquestration globale pourrait devenir celui d'une émissions globale. C'est un des "scénarios catastrophe" (que je ne souhaite pas vraiment !) que nous allons voir plus bas.

Le scénario catastrophe : les puits deviennent des sources

Si nous résumons ce qui précède, il y a donc deux "puits" naturels pour reprendre le CO₂ que nous émettons dans l'atmosphère :

- les écosystèmes continentaux, mais qui resteront, même non modifiés, de "petits" puits (ils ne pourront pas retirer beaucoup plus de CO₂ que ce qu'ils font aujourd'hui, et en outre ils ne peuvent stocker une quantité de carbone bien supérieure à l'actuelle : une fois que l'on a planté des forêts partout où l'on peut - et [on ne peut pas en planter tant que cela](#) - on a fait à peu près tout ce que l'on pouvait faire pour accélérer le processus),
- l'océan.

Pour les écosystèmes terrestres, c'est le sol contient l'essentiel du carbone, y compris pour les systèmes forestiers : le gros stock de carbone dans une forêt est... sous la surface. Il s'agit à la fois de parties de plantes ou détritiques de plantes (racines, bois mort ou feuilles mortes, humus) et d'organismes vivants (microbes, champignons, vers de terre...). Pour le moment, dans un écosystème à maturité, la décomposition des détritiques organiques du sol conduit à des émissions de gaz carbonique qui compensent globalement l'absorption de gaz carbonique par les plantes (voir plus haut).

Avec un "petit" changement climatique, cette décomposition s'accélère, mais la photosynthèse aussi. Avec un "gros" changement climatique, les plantes vont se mettre à dépérir, et donc le CO₂ qu'elles absorbent va baisser, alors que la décomposition continuera à émettre de plus en plus, et l'écosystème dans son ensemble peut passer de puits à source. Les forêts boréales, qui devraient particulièrement se réchauffer, pourraient suivre cette évolution, et des craintes existent aussi pour la forêt amazonienne, où la végétation pourrait souffrir par suite d'un assèchement du climat. Il est bien évident qu'en pareil cas, comme le processus d'auto-entretien (moins de forêts -> plus de CO₂ émis dans l'air -> plus de réchauffement climatique -> encore moins de forêts), il est très difficile de savoir où est le nouveau point d'équilibre (et quelle biomasse il reste à l'arrivée).

Un autre scénario catastrophe pourrait être lié à un nouveau stock de carbone fossile sous terre découvert il n'y a pas très longtemps (dans les années 1960) : les hydrates de méthane. Un hydrate de méthane se forme quand du méthane (composant principal du gaz naturel, et par ailleurs [gaz à effet de serre](#)) et de l'eau sont réunis à basse température et à haute pression (ce composé était à l'origine surtout connu comme une plaie des gazoducs en zones froides !).

L'hydrate de méthane est donc un cristal d'eau et de méthane, comme la glace est un cristal d'eau seule. Il n'y a pas de réaction chimique dans la formation de ce composé, et une simple élévation de température suffit à dissocier le méthane et l'eau. Sur Terre, il y a deux endroits où les conditions favorables à sa formation sont naturellement réunies :

➤ au sein des sédiments océaniques, sous quelques centaines de mètres d'eau (il fait froid et la pression est élevée), à cause du méthane provenant de la décomposition du plancton mort qui tombe en permanence de la surface océanique,

➤ sous le pergélisol, qui est le sol gelé en permanence des hautes latitudes (Nord de la Russie, du Canada), car on y trouve aussi du méthane, de l'eau (de la glace) et des hautes pressions (en allant assez profond).

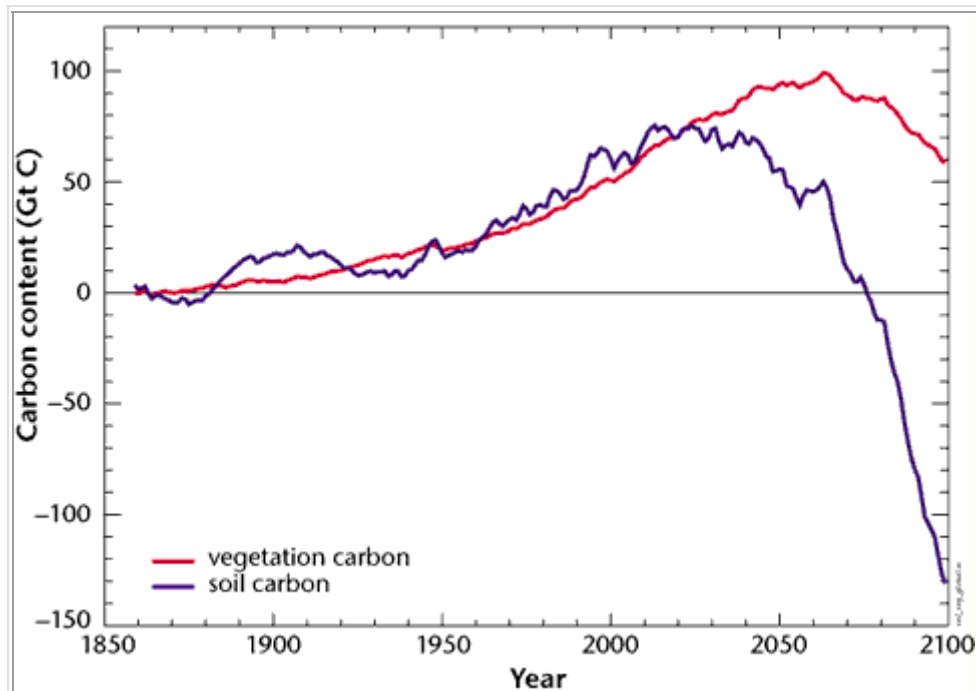
Un effet d'emballement pourrait se mettre en route à partir de ces hydrates avec un début de réchauffement, qui [conduirait à leur largage plus ou moins significatif dans l'atmosphère](#).

Le réchauffement climatique est également susceptible de ralentir fortement les [courants océaniques](#) allant de la surface vers les profondeurs (les courants thermohalins), voire de les supprimer. Comme ce sont ces courants qui entraînent le carbone dissous en surface dans les profondeurs, où se trouve le "grand puits", l'océan de surface étant un "petits puits" (comme on le voit sur le

graphique du haut de la page, l'océan intermédiaire et profond stocke 30 à 40 fois plus de carbone que l'océan de surface), on peut imaginer que sans circulation thermohaline l'océan devienne un puits marginal, qui finira en outre par "recracher" son CO₂ sous l'effet de la hausse de température au bout d'un certain temps.

On voit donc qu'il existe un risque que les puits - pris dans leur ensemble - s'atténuent puis disparaissent. En pareil cas, le système "s'emballerait", avec accumulation croissante, auto-entretenu, de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Personne ne sait à quel niveau d'élévation de température cela nous conduirait lorsque le nouvel équilibre se fera : 10 degrés en plus ? 20 ? 50 ?

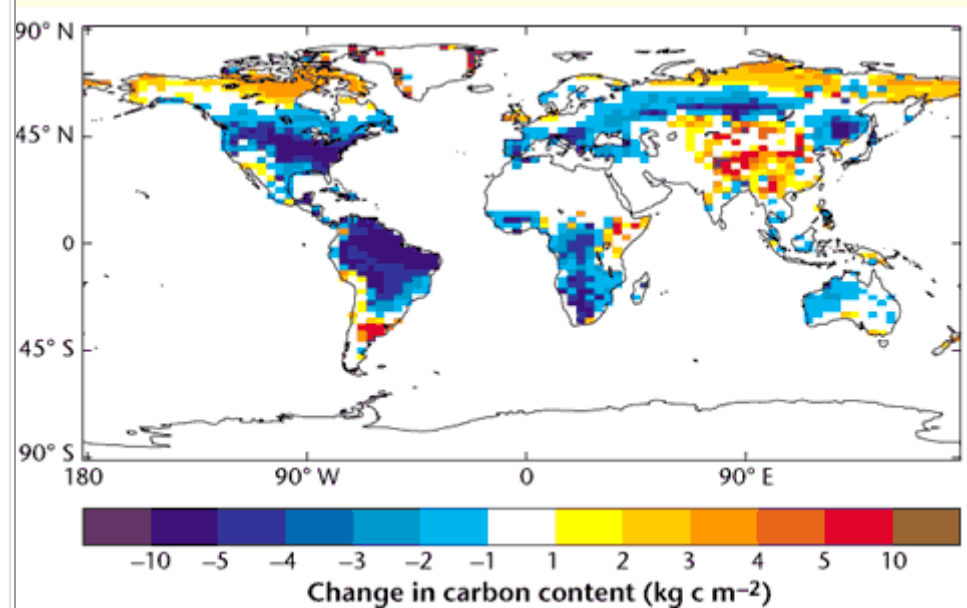
Il existe maintenant de plus en plus de [modèles](#) couplant évolution du climat et évolution des puits de carbone. Ce qui suit présente deux résultats, l'un venant du centre de modélisation britannique [Hadley Centre](#), dont les modèles sont considérés comme étant parmi les plus avancés au monde, et l'autre par l'un des grands centres français d'étude du changement climatique, l'IPSL. Il est important de noter que la simulation présentée ci-dessous ne prend cependant pas en compte les risques liés au méthane.



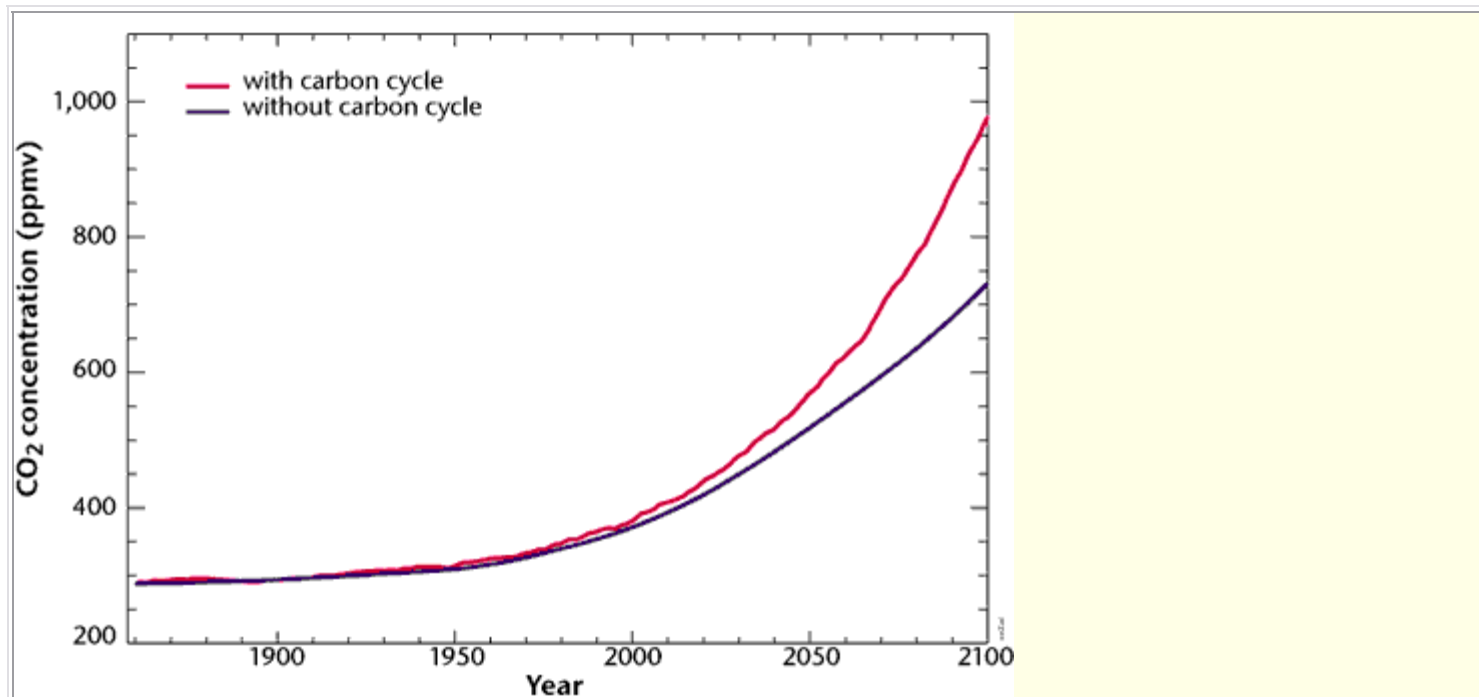
Simulation du Hadley Centre sur la variation du contenu en carbone des sols d'ici à 2100 sous l'effet d'un changement climatique croissant. On voit clairement que les sols passeraient du stade de puits à source (la courbe violette commence à descendre) vers 2050, et que la végétation suivrait le même chemin peu de temps après (la courbe rouge plafonne puis descend, mais beaucoup moins vite).

Le largage des sols vers l'atmosphère totaliserait environ 200 Gt de carbone entre 2050 et 2100. Les émissions d'origine humaine suivent le schéma IS92a, qui est un scénario "business as usual", et qui conduit à un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂ en 2100 (de 350 à 700 ppmv) hors rétroactions naturelles. Source : [Hadley Centre](#), 2001

L'expérience de l'[IPSL](#) donne des résultats qualitativement similaires.



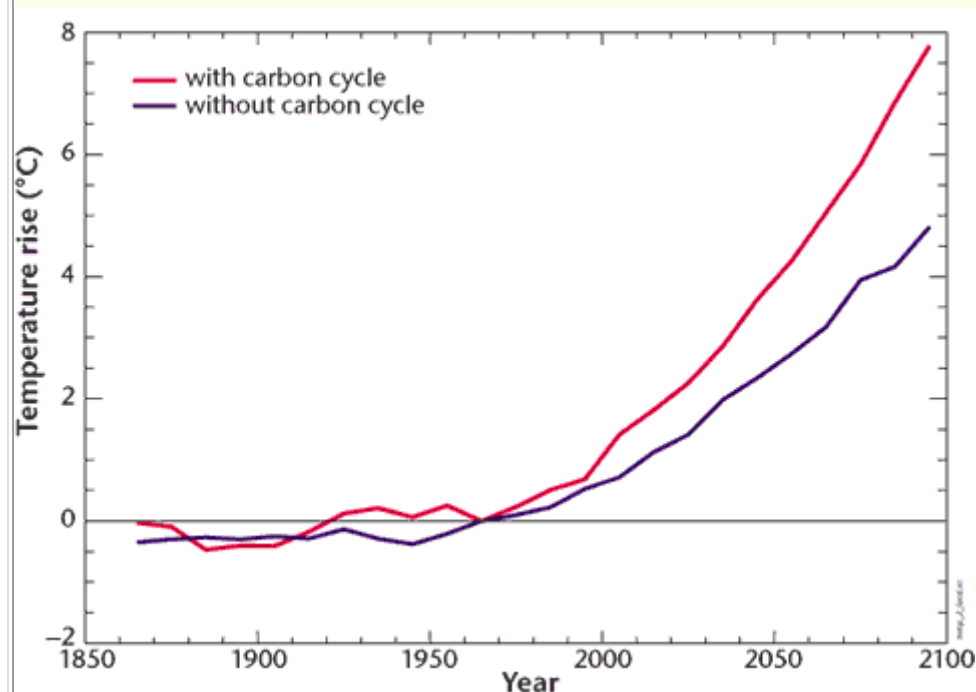
Variation du stock de carbone dans la végétation terrestre en 2100 par rapport à 1860, avec les mêmes hypothèses que ci-dessus concernant les émissions humaines. L'action humaine - déforestation - n'est pas prise en compte. Le stress hydrique prévu par ce modèle sur l'Amazonie explique le déstockage massif du carbone par les arbres qui s'y opère (mais cette évolution régionale n'est pas confirmée par la simulation de l'[IPSL](#)). Source : [Hadley Centre](#), 2001



Ces deux courbes représentent respectivement la concentration en CO₂ dans l'atmosphère si on suppose que la capacité d'absorption des écosystèmes terrestres reste intacte (courbe noire), et cette même concentration si on prend en compte l'affaiblissement du puits continental puis son passage comme source sous l'effet de la modification du climat (courbe rouge). Dans ce deuxième cas la concentration en CO₂ est 30% plus élevée en 2100 (1000 ppmv au lieu de 750). Les émissions humaines suivent aussi le scénario IS92a.

Source : [Hadley Centre](#), 2001

L'expérience de l'[IPSL](#) donne des résultats qualitativement similaires.



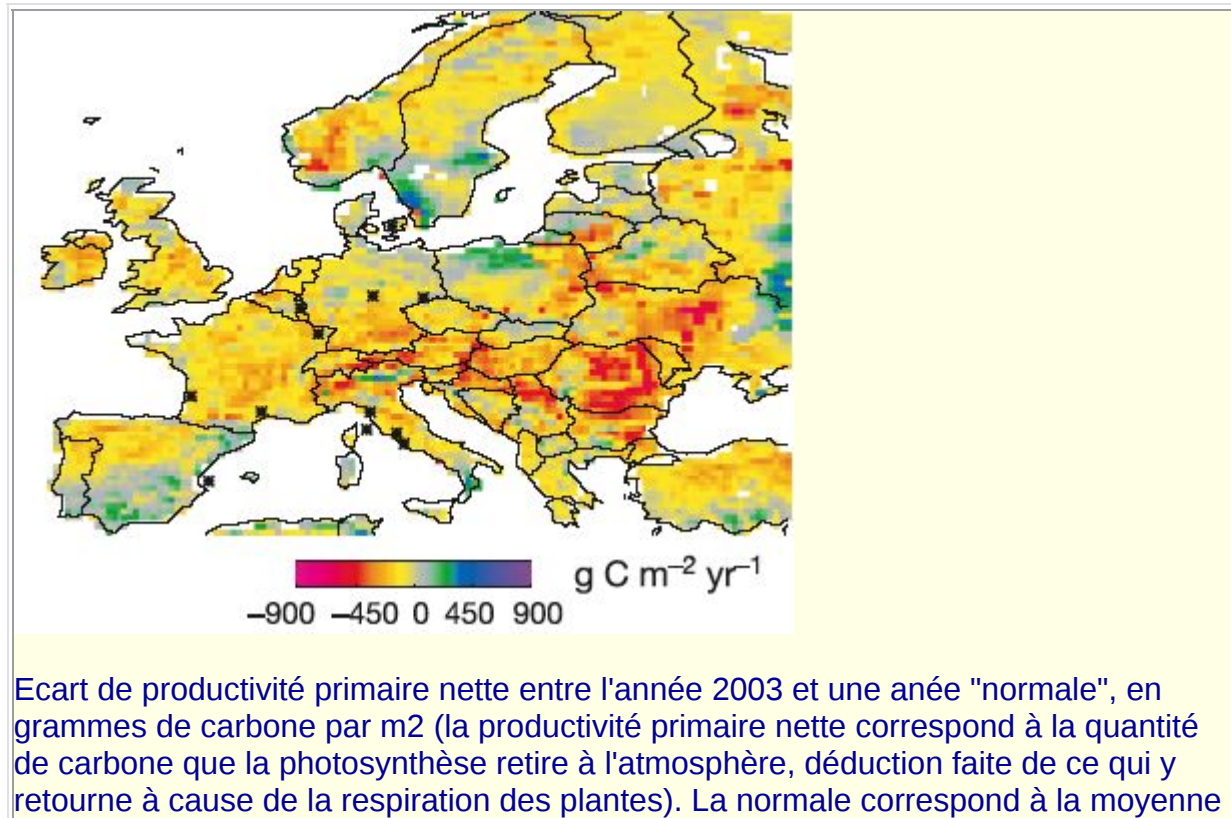
Ces deux courbes représentent respectivement l'élévation de température moyenne si on suppose que la capacité d'absorption des écosystèmes terrestres reste intacte (courbe violet foncé), et cette même élévation si on prend en compte l'affaiblissement du puits continental puis son passage comme source sous l'effet de la modification du climat (courbe rouge). L'hypothèse pour les émissions anthropiques est toujours la même (scénario IS92a du [GIEC](#)). On voit que la prise en compte des interactions entre climat et cycle du carbone induit un fort surplus de l'augmentation de la température : de 5°C en 2100 (hypothèse haute du GIEC) on passerait à 8°C (ce qui rend possible 15 à 20°C d'augmentation de la température moyenne sur certaines zones continentales, et de 20 à 30 °C aux pôles). Source : [Hadley Centre](#), 2001

Là aussi l'expérience de l'[IPSL](#) donne des résultats qualitativement similaires, quoi que les élévations de

température soient moins importantes, mais il n'en subsiste pas moins un écart conséquent selon que l'on prend en compte les effets du changement climatique sur le cycle du carbone ou pas.

Cette crainte de voir les écosystèmes continentaux se transformer de puits en source a été renforcée par l'observation de deux évolutions en Europe :

➤ une évaluation de la conséquence de la canicule de 2003 sur les échanges de CO₂ cette année là,



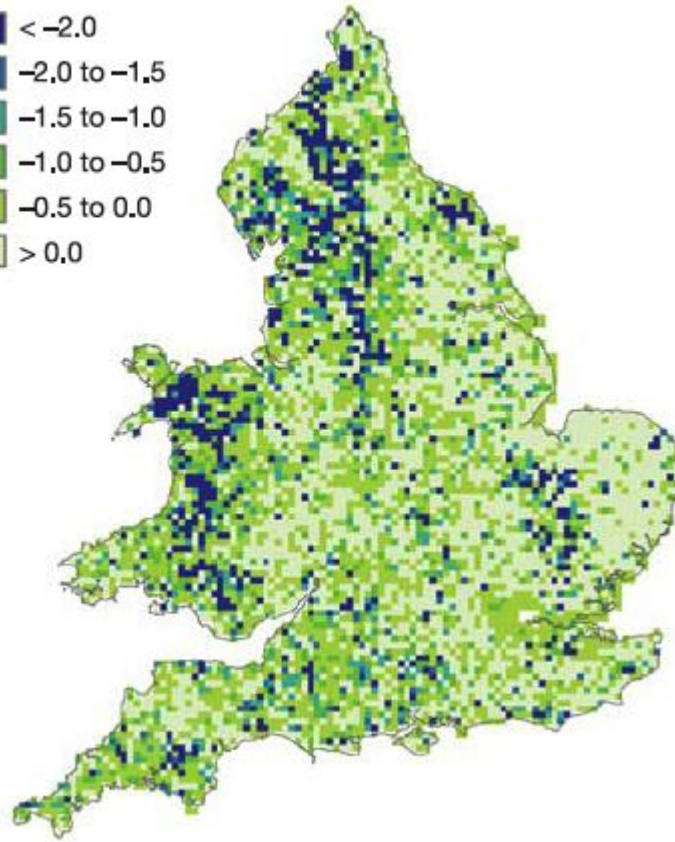
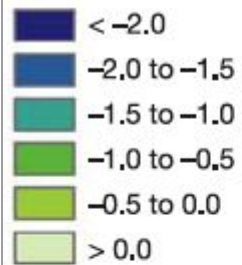
de la période 1998-2002).

Ces valeurs sont issues d'un bilan simulé à partir d'un échantillonnage. Partout où il y a du rouge, cela signifie que la productivité a baissé, reflétant en cela le stress hydrique et thermique des végétaux. Et peut-être que l'été 2003 sera l'été normal en 2050...

Source : Ciais et al., Nature, septembre 2005

➤ une mesure du contenu en carbone des sols sur une large partie de la Grande Bretagne à 30 ans d'intervalle.

b Rate of change ($\text{g kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)



Evolution du contenu en carbone des sols en Grande-Bretagne entre 1978 et 2003, en grammes de carbone gagnés ou perdus par kg de carbone initialement présent et par an (carte dressée à partir de 3000 points de mesure). Plus c'est foncé et plus le déstockage a été important, seule la zone la plus claire ayant conservé ou gagné du carbone.

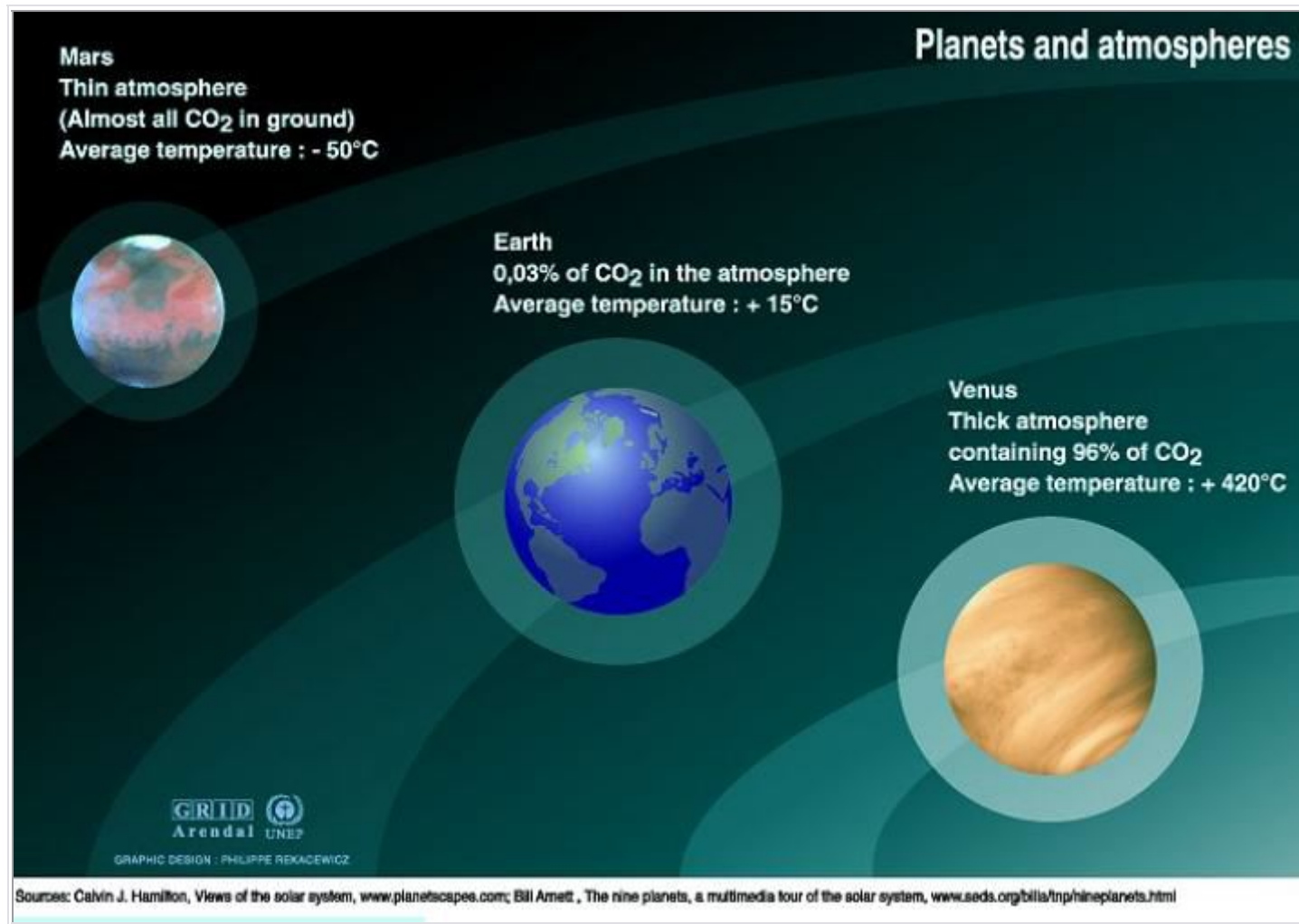
Il est facile de constater que les sols ont globalement perdu du carbone sur la période, et l'ordre de grandeur de ce qu'ils ont perdu est comparable à ce que la végétation située sur la même zone a stocké.

Source : Bellamy et al., Nature, septembre 2005

La question est donc posée de savoir "à quelle distance" nous sommes d'un "renversement" des puits de carbone continentaux. Si ce renversement arrive, c'est une très mauvaise nouvelle : nous aurons mis en route une machine infernale dont il est difficile de dire où elle s'arrêtera.

Nous avons près de chez nous un cas de figure extrême, montrant que l'effet de serre, poussé à ses limites, n'a justement pas beaucoup de limites : Vénus, notre proche voisine du système solaire, mérite bien son nom : c'est torride ! En effet, cette planète, à peu près de notre taille, et un peu plus près du soleil il est vrai (100 millions de km contre 150 millions pour la Terre), dispose d'une atmosphère essentiellement composée de gaz carbonique, qui est l'un des principaux [gaz à effet de serre](#).

Si nous "déplaçons" la terre sur l'orbite de Vénus, la température de notre planète passerait de 15 à 50 °C environ, or il règne à la surface de Vénus une température de 420°C et une pression de 90 atmosphères (celle qui règne sous 900 mètres d'eau).



L'essentiel de ce surcroît de température et de pression par rapport à la Terre est dû au très fort effet de serre de Vénus, et non à une plus grande proximité du soleil. Mercure, bien plus proche du Soleil, mais qui n'a pas d'atmosphère, et donc pas d'effet de serre, a une température de surface qui n'est "que" de l'ordre de 170 °C.

Il n'est bien sûr pas question que la température de la Terre grimpe jusqu'à 400 °C par suite du changement climatique induit par l'homme, heureusement ! Il faudrait en effet, pour cela, que tout le calcaire sur Terre retourne dans l'atmosphère sous forme de CO₂, et cela n'est pas vraiment prévu pour le moment. mais il n'en reste pas moins que la température de Vénus illustre le fait que l'effet de serre peut être une "cocotte-minute" très efficace, et qu'il faudrait se garder de trop monter le thermostat, de peur que des processus qui ne nous demanderaient plus rien se chargent d'accélérer la chose sans que nous ne puissions rien y faire...

Pour en savoir plus (pour lecteurs avertis) :

► un article sur les [fonctions de "puits" de l'océan](#)

Combien de forêts planter pour compenser nos émissions de gaz carbonique ?

janvier 2001 - dernière modification : août 2007

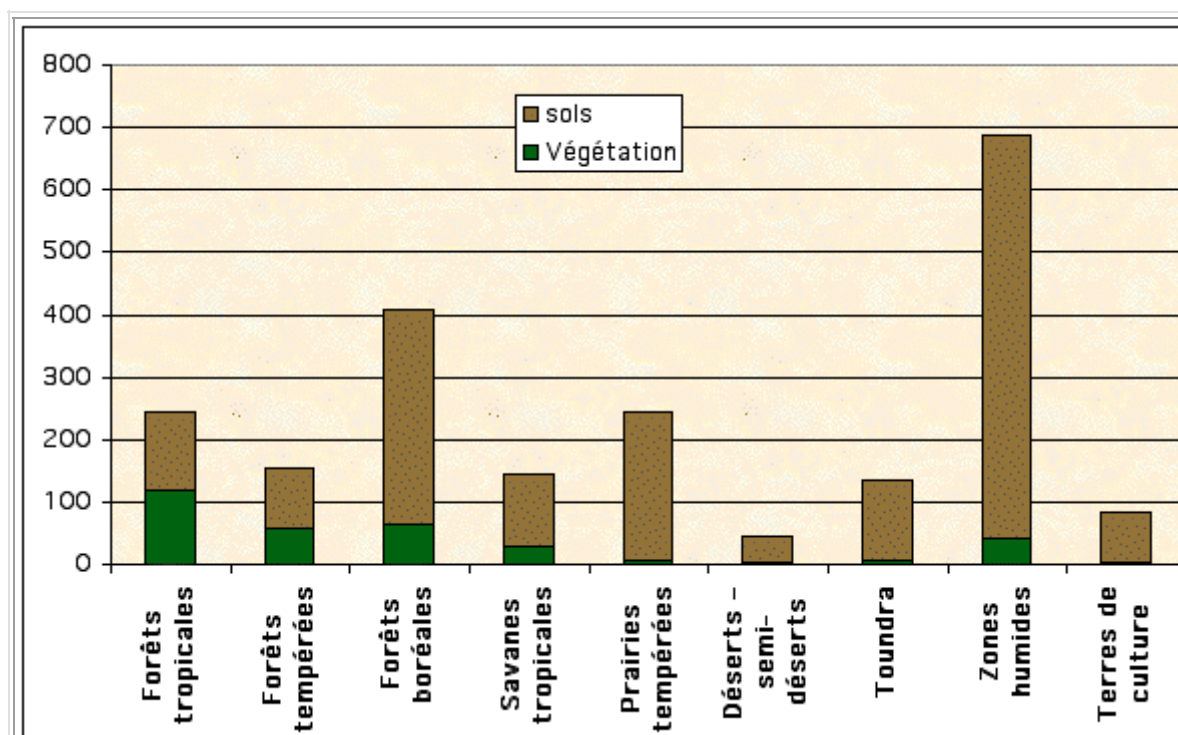
site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Ce serait trop dur de limiter nos émissions ? Augmentons la capacité de la planète à les récupérer ! C'est ainsi que les forêts reviennent périodiquement sur le devant de la scène, à cause de toutes les vertus qu'il y aurait à les prendre en compte comme moyen de compenser [les émissions de gaz carbonique liées aux activités humaines](#). Comme d'habitude, le Diable est dans la règle de trois : peut-on se fixer les idées sur les ordres de grandeur en présence ?

Tout d'abord il faut savoir qu'une forêt n'est un [puits de carbone](#) que quand elle est jeune : une forêt à maturité (cas des forêts qui ont dépassé le siècle, en gros), comportant des arbres qui meurent et des arbres qui poussent, émet à peu près autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe : certes des arbres poussent, mais la décomposition de ceux qui sont morts (ou plus exactement la respiration des micro-organismes qui se nourrissent de la matière organique des êtres morts) conduit à des émissions de CO₂ à peu près équivalentes à ce qui est absorbé par la croissance des arbres vivants.

De ce fait, pour prendre un cas particulier bien connu, il y a des tas de bonnes raisons de conserver l'Amazonie dans le meilleur état possible, mais pas parce qu'elle est le poumon de la planète : en bilan net, elle ne produit pas le moindre litre d'oxygène pour nous !

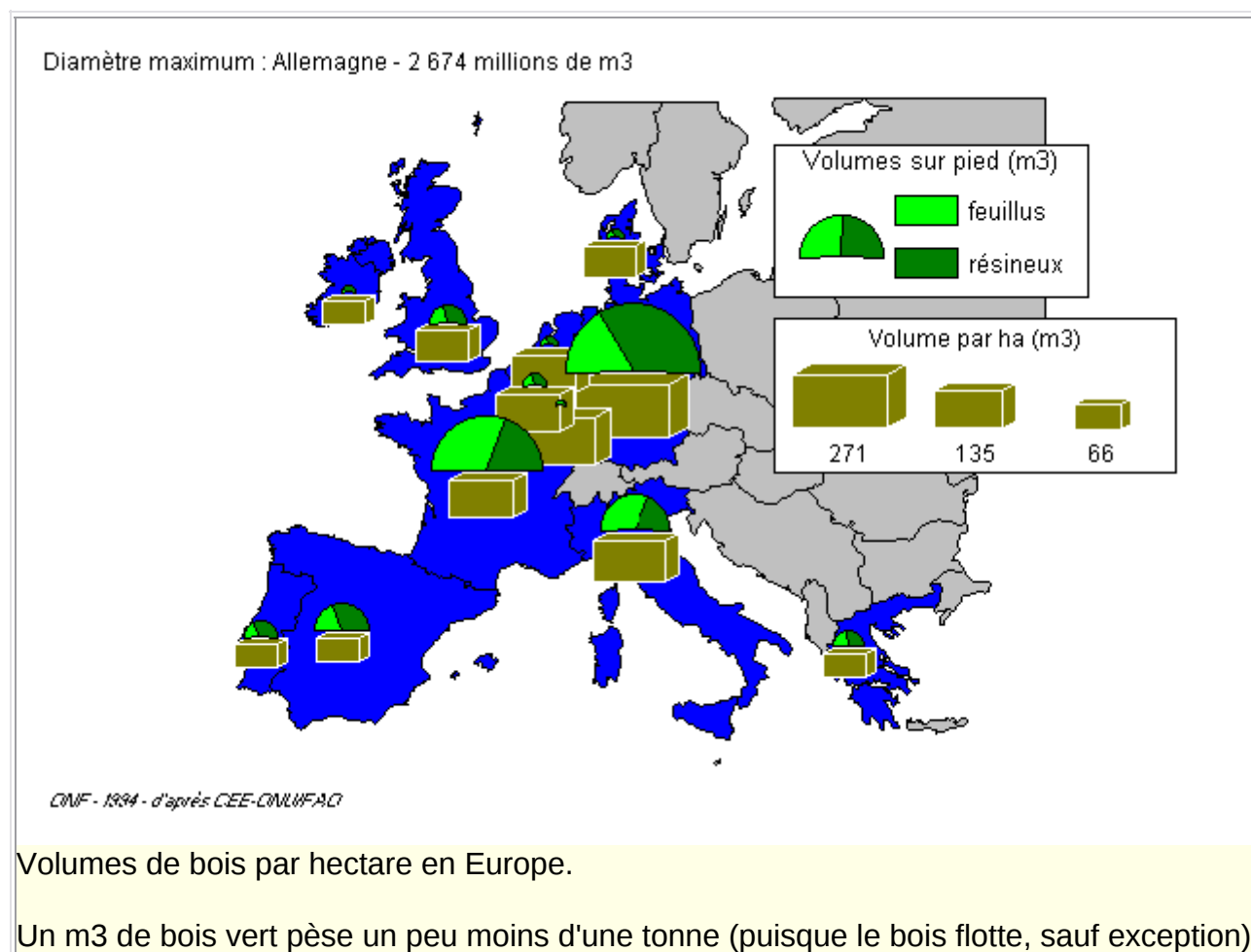
Lorsqu'une forêt est à maturité, elle contient (en incluant le carbone contenu dans le sol, sous forme de racines, d'humus, de micro-organismes divers, de vers de terre, etc) environ 200 tonnes de carbone à l'hectare (un peu moins sous nos latitudes, un peu plus en zone tropicale, beaucoup plus il est vrai en zone boréale, mais elles sont déjà les plus boisées).



Contenus approximatifs en carbone par hectare de divers types d'écosystèmes.

Source : [GIEC](#), 2001

Notons que ce chiffre est cohérent, quoique supérieur, avec celui donné par le parlement européen en ce qui concerne les forêts européennes (carte ci-dessous), dont je n'ai pu déterminer s'il concerne uniquement les grumes (les troncs) ou aussi les branches et feuilles (les forestiers donnent volontiers des chiffres qui ne concernent que la partie "intéressante" pour eux, à savoir les troncs et les grosses branches).



Une fois sec, ce m³ pèse environ 600 kg pour les espèces de nos latitudes, dont la moitié est du carbone. Le bois sec contient donc à peu près 500 kg de carbone par tonne, ou 300 kg de carbone par m³. Les forêts européennes contiennent donc de l'ordre de 25 à 90 tonnes de C à l'hectare pour la seule végétation.

Source de la carte : [Parlement européen](#)

Pour faire une forêt à maturité, il faut à peu près un siècle (ordre de grandeur). Par ailleurs, quand on plante une forêt, il y avait déjà "autre chose" avant, et donc ce qui compte n'est pas la totalité de ce que la forêt absorbe, mais ce qu'elle absorbe "en plus" de ce que la végétation qui précédait absorbait. Enfin l'absorption n'est pas constante : elle est faible au début, quand les plants sont tous petits, et redevient faible lorsque la forêt est à maturité, avec très certainement un maximum entre les deux.

Avant d'aller plus loin, une première conclusion est donc que planter des forêts n'engendre un gain **que dans le cas où ces forêts remplacent des terres agricoles**. En cas de remplacement de prairies, le bilan est nul à défavorable en ce qui concerne l'évolution du stock de carbone à l'hectare, puisque le contenu en carbone d'une prairie (sol et végétation, l'essentiel du stock étant contenu...dans le sol, voir graphique ci-dessus) est le même que celui d'une forêt tempérée, en ordre de grandeur. Il faut aussi, bien sûr, que la forêt plantée ne remplace pas une autre forêt !

Planter des arbres ne peut donc pas être considéré comme une variable d'action sans précision sur ce qu'ils remplacent. Comme l'éventualité d'une diminution des terres agricoles n'est pas vraiment à l'ordre du jour sur une planète qui connaît une augmentation galopante de sa démographie, on pourrait s'arrêter là et dire que cela n'a aucun intérêt.

Continuons quand même l'exercice pour parachever la démonstration. En première approximation, compte tenu de ce qui précède, on peut donc dire qu'une forêt en croissance absorbe de l'ordre de 2 tonnes de carbone à l'hectare par an (il s'agit bien d'une approximation sur ce qu'elle absorbe en plus de ce qu'une autre végétation aurait fait). Actuellement, les émissions humaines de gaz carbonique que [la biosphère ne recycle pas naturellement](#) sont de l'ordre de 3.000.000.000 tonnes de carbone par an.

En supposant qu'un hectare de forêt nouvellement plantée séquestre 2 tonne de carbone par an, donc, il faudrait donc planter 1.500.000.000 hectares de forêts en ordre de grandeur, en remplacement de terres agricoles, pour que, avec des émissions restant en outre au niveau de 1990 (hypothèse hardie aujourd'hui !), les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère n'augmentent pas.

Pour fixer les idées, cela représente la plantation d'un huitième des terres émergées, ou encore environ 2 fois le Sahara, ou encore 30 fois la superficie de la France.

Comme en plus [nos émissions augmentent](#), si on veut compenser par des arbres il faut d'ores et déjà dimensionner pour ce qui se passera plus tard. Prenons maintenant 20 ans comme horizon, et supposons - ce n'est pas très éloigné de la proposition américaine - que les plantations doivent compenser les émissions à venir, non contraintes par ailleurs.

Pour fixer les idées, en Europe de l'Ouest, sur la base d'une croissance économique de 2% par an, et en "laissant faire", [les émissions de CO₂ augmenteront de 50% d'ici 2020](#). Si l'on extrapole au reste du monde, dont la croissance est au moins aussi forte (les PVD sont plutôt entre 5 et 10%), et ce qui est cohérent avec les [scénarios "hauts" du GIEC](#), cela signifie que **pour compenser nos émissions de CO₂ en excès, non contraintes par ailleurs, il faudrait planter des arbres sur des terres agricoles représentant entre un cinquième et un quart des terres émergées, c'est à dire...boiser quasiment l'intégralité des terres aujourd'hui cultivées dans le monde ! Un quart des terres émergées, c'est aussi l'équivalent des forêts actuelles.**

Ce n'est pas totalement impossible, certes ! Je ne suis cependant pas sûr de postuler comme chef de projet...

Et cette "plantation" aurait en outre les caractéristiques suivantes :

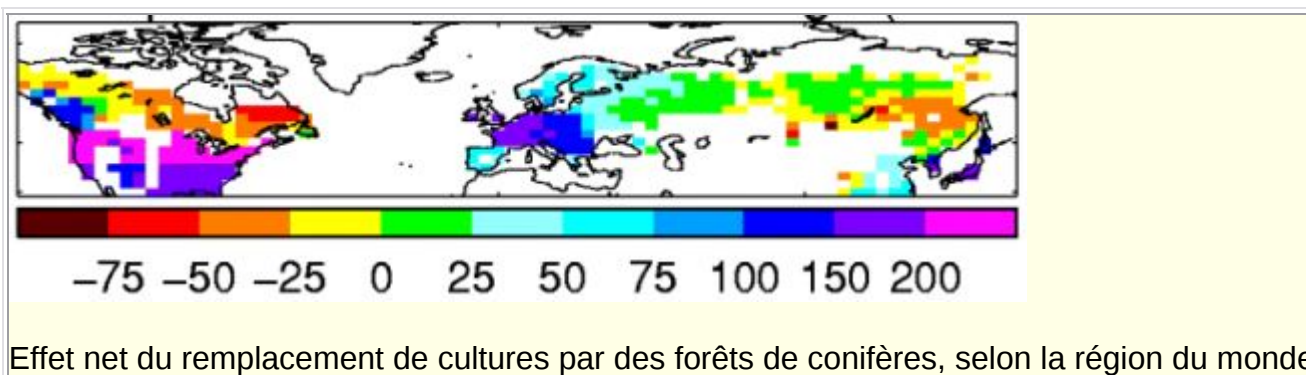
- elle ne servirait qu'à stabiliser la concentration atmosphérique du CO₂, donc la perturbation apportée au climat par ce gaz, mais ne permettrait pas de la faire diminuer,
- elle ne concernerait que le CO₂ (65% des émissions de [gaz à effet de serre](#)),
- une forêt cessant d'être un puits au bout d'un siècle, il faudrait recommencer l'opération tous les siècles si nous avons toujours recours aux [sources fossiles](#) d'ici là, et donc boiser un quart supplémentaire des terres émergées à partir de 2100 (sans déboiser celui déjà planté).

Enfin, ***in cauda venenum*** : en cas de remplacement de terres agricoles par des forêts, il y a un autre élément d'importance : l'albédo change. L'albédo, c'est le nom que l'on utilise pour la mesure du pouvoir réfléchissant d'une surface : un miroir parfait a un albédo de 100% (il réfléchit toute la lumière qu'il reçoit), une surface parfaitement noire a un albédo nul (elle ne réfléchit rien).

L'albédo moyen de la Terre est l'un des déterminants pour la température qu'il fait, car plus l'albedo moyen est fort, et plus l'énergie solaire est directement réfléchi vers l'espace, sans avoir eu le temps de chauffer le sol : 1% d'albédo en plus sur la moyenne terrestre, cela engendre une baisse de la température moyenne de l'air au niveau du sol de 0,75 °C environ, et réciproquement : 1% d'albedo en moins et la température moyenne monte de 0,75 °C environ.

Or une forêt a un albédo de 5 à 15% (c'est à dire qu'une forêt réfléchit 5 à 15% seulement de la lumière qu'elle reçoit), et une terre agricole de 25%. En plantant des arbres là où il n'y en avait pas, on diminue donc la réflexion de la surface de la Terre, qui absorbe donc plus d'énergie qu'avant (car le [rayonnement solaire contient de l'énergie](#)).

Un physicien a regardé comment l'effet de "soustraction du CO₂" et celui de "diminution de la réflexion" se comparaient en cas de boisement de terres agricoles. Le résultat est instructif : dans certaines régions du monde, la diminution de l'effet de serre (parce qu'il y a moins de CO₂ dans l'air) l'emporte sur l'augmentation de la température due à la part plus grande du rayonnement solaire absorbée par le sol, mais l'inverse peut aussi se produire ! Planter des forêts à la place de terres agricoles conduit alors à un réchauffement net de la surface.... (graphique ci-dessous).



concernée, en "équivalent émissions de carbone à l'hectare". Là où il n'y a que du blanc, on suppose que l'on n'a touché à rien. Là où il y a des couleurs, on a comparé l'effet de stockage (positif) des forêts remplaçant les cultures, avec l'effet supplémentaire de "capture" de chaleur lié à la diminution de l'albédo. Si le résultat est positif, cela signifie que le stockage de carbone l'emporte sur la diminution de la réflexion, et donc que l'effet du reboisement est globalement "refroidisseur" du climat. Il est facile de constater que cela n'est pas vrai de manière systématique : pour certaines régions du monde, reboiser conduit à un réchauffement net du climat, ou a un effet proche de zéro (jaune, vert clair).

Source : Betts, Nature, 2000

Qui sont les scientifiques ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

L'un des termes les plus fréquents dans le débat sur l'effet de serre est "les scientifiques". Qu'ils soient invoqués pour appeler à la prudence, ou pour justifier la contestation des dangers à venir, il n'y a qu'un seul et même terme : "les scientifiques". Le profane s'imaginera peut-être qu'il s'agit d'une catégorie homogène et peu nombreuse, et que tout "scientifique" possède nécessairement un avis autorisé sur l'évolution climatique. Rien ne saurait être plus inexact !

Bien sûr, il y a tout d'abord des modélisateurs. Ils travaillent par exemple, en France, au [Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS](#), ou en Grande Bretagne au [Hadley Centre](#). Ces modélisateurs simulent une évolution future du climat en se basant sur

- la compréhension du monde qui leur est fournie par d'autres disciplines de la science, que j'aborde ci-dessous.
- des [modèles](#), qui sont sensés représenter au mieux cette compréhension. Ils sont aidés, quelques fois, pour cette deuxième tâche, par des gens dont le métier est de faire des logiciels scientifiques pour la modélisation, mais pas nécessairement uniquement sur le climat. C'est par exemple le cas du [CERFACS](#).
- des [scénarios](#), qui décrivent quelques cas de figure possibles sur la manière dont va évoluer le monde.

Mais surtout, comme je viens de le dire, la modélisation ne vise qu'à reproduire le monde réel (un modèle n'invente rien : il ne fait que tenter de reproduire), **et il y a énormément de disciplines qui concourent à nous faire comprendre comment fonctionne notre planète**, et dont les résultats sont exploités dans le dossier du changement climatique. Afin de bien faire comprendre ce point, je donne ci-dessous une **petite partie** (nécessairement : je suis loin d'en avoir fait le tour !) des disciplines concernées, et pour chacune d'elles j'ai mis un site web d'une équipe pour illustrer mon propos.

Mais chaque discipline possède des centaines de sites web. Sur bon nombre des serveurs que je cite, vous pourrez découvrir par vous même la grande quantité de liens vers d'autres organismes traitant du même sujet : les "scientifiques", cela fait du monde !! Et vous verrez que la quasi-totalité des disciplines concernées ne sont pas nées avec l'étude du changement climatique, et que leurs résultats sont validés dans d'autres cadres.

Voici donc ce que donne un début d'inventaire (liste non exhaustive) si l'on essaie de savoir qui fait partie des "scientifiques" :

- des **astronomes**, qui s'intéressent à l'activité du Soleil, et aux variations de l'orbite de la Terre, toutes choses qui conditionnent la quantité d'énergie reçue par notre planète (qui est primordiale pour le climat), que l'on trouvera par exemple, en France, à l'[Observatoire Midi-Pyrénées](#), mais également à bien d'autres endroits,
- des **astrophysiciens**, qui décrivent certaines caractéristiques de l'Univers qui conditionnent notre environnement (rayonnement cosmique par exemple) et que l'on trouvera par exemple à l'[Institut d'Astrophysique spatiale](#),
- des **aérologues**, qui étudient la composition de l'atmosphère et son fonctionnement général, ce qui est indispensable pour savoir comment se répartit l'énergie dans l'atmosphère et au sol, comme par exemple ceux du [laboratoire d'aérologie du CNRS à Toulouse](#), mais aussi de la [NOAA américaine](#),
- des **océanographes**, qui étudient le comportement de l'océan, lequel est primordial pour les évolutions à moyen et long terme, par exemple à l'[IFREMER](#),
- des **biogéochimistes**, qui étudient les grands cycles des éléments (carbone, azote, etc) sur la terre, et que l'on peut par exemple trouver au [LEGOS](#),

- des **hydrologues**, qui s'intéressent au cycle de l'eau, par exemple ceux du centre de [Wallingford](#) en Grande Bretagne,
- des **météorologues**, qui disposent d'archives permettant de comparer la manière dont les modèles simulent le climat passé avec ce qui a réellement été mesuré, comme par exemple ceux de [Météo France](#),
- des **biologistes** et des **agronomes**, qui étudient le comportement des végétaux dans des conditions climatiques différentes, par exemple ceux de l'[INRA](#),
- des **spécialistes des glaces** : des glaciologues, pour analyser la composition des glaces anciennes et en tirer des renseignements sur le temps qu'il a fait au moment de la chute de neige, que l'on trouvera par exemple au [laboratoire de glaciologie de Grenoble](#),
- des **géologues**, dont les connaissances sont mises à profit à divers titres (cycle du carbone, montée des océans, volcanisme...), par exemple ceux de l'[institut de Physique du Globe](#),
- des **physiciens des particules**, qui ont expliqué la formation de certains isotopes radioactifs (qui seront ensuite utilisés par les spécialistes de la ligne suivante), par exemple ceux qui travaillent au [CERN](#),
- des **spécialistes des faibles radioactivités et de l'analyse isotopique**, comme ceux qui interviennent pour la datation au carbone 14, ou qui reconstituent les températures du passé grâce à la proportion de deuterium dans la glace, et que l'on peut trouver en France - entre autres - au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#).
- des **dendrochronologues**, qui reconstituent les températures des derniers millénaires en analysant les cernes des troncs des vieux arbres (ou des arbres morts), par exemple ceux qui travaillent au [Laboratory of Tree-Ring Research \(LTRR\), at the University of Arizona](#)
- des **spécialistes de la mesure physique**, qui mesurent désormais en continu les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, l'un des lieux mondialement connus pour ce faire étant l'Observatoire américain de [Mauna Loa](#) (Hawaii).

J'ai sûrement oublié beaucoup monde... Mais j'espère avoir convaincu le lecteur que de se permettre de contester "les scientifiques" en matière de changement de climat, cela équivaut à avoir un avis pertinent sur toutes les disciplines mentionnées ci-dessus. Ce n'est assurément pas le cas de tous ceux qui critiquent !

Les "scientifiques" sont-ils écologistes ?

L'un des arguments les plus souvent employés par les "contestataires" du fait que l'homme est devenu un agent climatique est que les "scientifiques" sont embarqués dans un vaste complot fomenté par des écologistes qui leur font dire n'importe quoi. Cela suppose, pour être cohérent, que ces "scientifiques" sont tous des écologistes sincères, mentant effrontément parce que leur cœur aveugle leur raison.

Or, en espérant que je ne vexerai aucun d'entre eux, il faut le dire haut et fort : les "scientifiques" ne sont pas plus écologistes que le reste de la population, et même plutôt moins. A peu près tous ceux que je connais roulent en voiture, prennent l'avion (très nettement plus que la moyenne des Français, or l'avion est ce que l'on fait de pire en matière de transport), mangent de la viande à tous les repas (rappelons que l'agriculture est la première source d'émission en France, notamment à cause du fait que nous mangeons beaucoup de viande), habitent de grandes maisons chauffées au gaz ou au fioul, disposent d'un parc électroménager au-dessus de la moyenne, etc.

Ceux que je connais - mais je n'aurai pas la prétention de les avoir tous rencontrés - ne semblent pas plus avoir envie de se passer de ces éléments de mode de vie que mes voisins (alors que la lutte contre le changement climatique le demanderait), et aucun de ceux que j'ai croisés ne vit dans les arbres, vêtu de peaux de bêtes, en souhaitant ardemment être imités par le reste de la population. Vous les rencontreriez à un dîner sans savoir ce qu'ils font, vous les considéreriez comme des individus parfaitement normaux, au sens de "dans la norme". Je ne sais s'il faut le déplorer, mais une chose est sûre : l'argument qui voudrait que les "scientifiques" aient leur bon sens aveuglé par leur idéologie ne correspond absolument pas à un quelconque début de réalité. La curiosité a toujours été une motivation bien plus puissante chez les chercheurs que le salut de l'humanité !

Et, à ma connaissance, Greenpeace ou le WWF n'ont jamais donné un kopeck au CEA ou à la NASA (qui possèdent tous les deux des laboratoires notoires sur le sujet) pour financer leurs recherches.

Il faudra que ceux qui refusent d'accepter les conclusions que nous pouvons tirer des connaissances que nous avons sur notre avenir climatique trouvent autre chose comme argument : celui-là est une pure chimère, comme du reste [bien d'autres arguments avancés par les "contestataires"](#).

Panorama de quelques disciplines scientifiques concernées : un peu de lecture instructive

Je recommande vivement, pour approfondir ce sujet, la lecture aussi distrayante qu'instructive du livre de Gérard LAMBERT intitulé "[La Terre Chauffe-t-elle](#)".

Depuis quand "sait-on" pour l'effet de serre ?

novembre 2002 - révisé septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Au vu des [articles parfois passionnés](#) paraissant sur la fiabilité des travaux des [scientifiques se penchant sur l'évolution du climat](#), il est assez tentant de déduire que la science dans ce domaine s'appuie sur des travaux très récents qui demandent encore à être confirmés [avant que nous n'agissions](#). En fait, certaines bases scientifiques de l'affaire ne datent pas d'hier....et sont même fort anciennes !

Je vous propose ci-dessous une petite chronologie du réchauffement climatique, avec quelques années importantes liées à cette affaire.

Fin du 18^e siècle : Horace Bénédict de Saussure, naturaliste suisse, construit un appareil constitué de cinq caisses de verre emboîtées les unes dans les autres, et place un thermomètre dans chaque caisse. Il observe que lorsque cet assemblage est exposé à la lumière du jour, plus l'on va vers le centre, et plus la température mesurée est élevée. Il comprend que le vitrage de la serre "piège" l'énergie solaire, et pense que l'atmosphère agit de même.

1824 : Joseph Fourier, physicien français, publie "*Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*", où il expose que la température du sol est augmentée par le rôle de l'atmosphère, qui laisse mieux passer le rayonnement solaire que le rayonnement infrarouge émis par la Terre (voir [aspects physiques de l'effet de serre](#)), et s'inspire des travaux de Saussure pour baptiser cela "effet de serre".

1838 : Claude Pouillet, physicien français, attribue l'effet de serre naturel à la [vapeur d'eau et au gaz carbonique](#). Il conclut que toute variation de la quantité de vapeur d'eau, comme de CO₂, devrait se traduire par un changement climatique.

1860 : les propriétés optiques et radiatives des gaz atmosphériques sont étudiées par John Tyndall, physicien irlandais, qui confirme que [les principales molécules responsables de cet effet de serre](#) sont la vapeur d'eau et le gaz carbonique.

1896 : Svante Arrhenius, chimiste Suédois (il recevra le Prix Nobel en 1903 pour des travaux liés à l'électrolyse) calcule qu'un doublement du gaz carbonique dans l'atmosphère engendrera une élévation de la température moyenne de la planète de 4°C, et prédit en conséquence que l'utilisation intensive des combustibles fossiles engendrera un réchauffement climatique.

Dans un ouvrage publié en 1910 et intitulé "L'évolution des mondes" (titre français), il écrit : "***l'acide carbonique*** [nom alors donné au CO₂, NDR] ***doublerait-il en quantité, que nous gagnerions 4 degrés; il devrait augmenter de quatre fois son volume actuel pour gagner 8 degrés. En même temps sa diminution accentuerait les différences de chaleur et de climat des différentes parties du globe ; son augmentation égaliserait au contraire la température***"[ce qui signifie qu'il avait compris que dans une élévation globale, les pôles se réchaufferaient plus que les tropiques, NDR].

1902 : L'existence de la stratosphère est annoncée par Léon Teisserenc de Bort, lors d'un discours à l'Académie des Sciences (française). Sa découverte résulte de la mise au point des ballons sonde, dont il lâchera près de 300 exemplaires. Ses travaux aideront à comprendre que l'ozone est un gaz qui absorbe le rayonnement solaire (en fait les ultraviolets).

1920 : Lewis Fry Richardson, un physicien anglais, tente une première expérience de modélisation du climat à partir des seules équations de la physique (sans ordinateur, bien sûr !). Il n'y parvient pas et conclut qu'il aurait fallu disposer de milliers de personnes pour effectuer les calculs élémentaires nécessaires.

1947 : les expéditions destinées à effectuer des prélèvements dans les fonds marins, lesquels ont été effectués pour la première fois vers 1850, connaissent deux épisodes importants : l'expédition suédoise sur l'Albatross, et les expéditions américaines de Maurice Ewing. Ces prélèvements ont joué un rôle majeur dans les reconstitutions des climats du passé.

1950 : [Julius Charney](#), directeur de l'*Institute for Advanced Study* de l'université de Princeton (Etats-Unis) développe, avec le mathématicien John von Neumann (pionnier des machines numériques), le premier modèle numérique de prédiction météorologique. Ces travaux sont permis par la mise au point, en 1946, du premier ordinateur ayant jamais existé : l'Electronic Numerical Integrator and Calculator (ENIAC).

1950 : création de l'[Organisation Météorologique Mondiale](#) (WMO pour l'acronyme anglais).

1958 : cette année, baptisée "*année géophysique internationale*", voit le lancement des premiers satellites (dont Explorer 1 et les suivants de la série permirent la découverte des ceintures de Van Allen), et surtout le début de la mesure en continu de la concentration en gaz carbonique dans l'air à l'observatoire de Manua Loa (Hawaï), qui a permis de mettre en évidence l'[augmentation de cette concentration](#), année après année, depuis lors.

1966 : Des scientifiques américains réalisent le premier forage glaciaire au Groenland et extraient une carotte de glace de plus d'un kilomètre de long. De nombreux autres suivront, dont ceux de Vostok en Antarctique, réalisé par une équipe américano-russo-française (la partie scientifique est surtout russe et française, les américains ayant surtout fourni la logistique), d'où sera tirée la [courbe devenue célèbre](#) sur les variations simultanées du CO₂ et de la température sur 400.000 ans.

Années 70&80 : l'avènement progressif des ordinateurs et des satellites permet le développement rapide de la [modélisation climatique](#). A cette époque c'est l'atmosphère seule qui est modélisée.

Années 1980 : de nombreux programmes internationaux sur l'étude du climat sont lancés, visant à favoriser les collaborations inter-équipes et à comparer les résultats des recherches : [World Climate Research Program](#) (WCRP), [CLIMAP](#) (étude de climats du passé), [PCMDI](#) (comparaison des modèles climatiques), et encore bien d'autres....

1987 : Création de l'International Panel on Climate Change (IPCC), dont la traduction française est Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), sous l'égide de l'[Organisation Météorologique Mondiale](#) et du [Programme des Nations Unies pour l'Environnement](#). Le rôle du GIEC est de faire périodiquement la synthèse des travaux scientifiques concernant l'impact de l'homme sur le climat (voir [page expliquant son fonctionnement en détail](#)).

1990 : le GIEC publie son premier rapport d'évaluation, qui conclut à la forte probabilité d'une influence humaine décelable sur le climat.

Années 1990 : Début des simulations couplant modèles océaniques et modèles atmosphériques. Les premiers modèles incluant aussi la végétation apparaîtront à la toute fin de la décennie.

1992 : Signature, lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro, de la "[Convention Climat](#)", qui sera ratifiée par la quasi-totalité des pays du globe. Cette convention propose de "***stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique***" et prévoit que les "parties" (c'est à dire des signataires de la Convention Climat) se réuniront à intervalles réguliers (actuellement une fois par an) pour la mise en oeuvre de cet objectif.

1992 : le gouvernement français crée la [Mission Interministérielle de l'Effet de Serre](#).

1997 : Signature, lors de la 3ème "réunion des parties", du [protocole de Kyoto](#).

2001 : le GIEC publie son [troisième rapport d'évaluation](#) (le second a été publié en 1996), en 3 fois 800 pages. Il confirme que nos émissions massives de gaz à effet de serre vont modifier le climat, et que l'élévation de température enregistrée depuis un siècle est, pour une large part, très probablement le début de ce processus. Le prochain rapport est prévu pour 2007.

2004 : En ratifiant le [Protocole de Kyoto](#), la Russie garantit son entrée en vigueur le 16 février 2005.

Qu'est-ce que le GIEC ?

dernière version : décembre 2008

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) est une organisation qui a été mise en place en 1988, à la demande du G7 (groupe des 7 pays les plus riches : USA, Japon, Allemagne, France, Grande Bretagne, Canada, Italie), par

➤ l'[Organisation Météorologique Mondiale](#)

et par

➤ le [Programme pour l'Environnement des Nations Unies](#)

Son appellation anglaise est IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change. Le rôle du GIEC est "**d'expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique provoqué par l'homme**".

Comme toutes les institutions onusiennes (l'OMS par exemple), le GIEC n'est pas une association de personnes physiques, mais une association de pays : ses membres sont des nations, non des personnes physiques. Aucun individu - et en particulier aucun chercheur - ne peut être membre du GIEC "en direct" : les personnes qui siègent aux assemblées du GIEC ne font que représenter des pays membres.

En pratique, à peu près tous les pays membres des Nations Unies sont membres du GIEC (deux exceptions sont Taiwan et le Vatican - comme bien d'autres personnes je suppose je serais intéressé à connaître la position du Pape sur le changement climatique !), et donc dans la pratique quasiment tous les pays du monde sont adhérents du GIEC.

Il ne s'agit donc pas d'un laboratoire de recherche, mais d'un organisme qui effectue une évaluation et une synthèse des travaux de recherche menés dans les laboratoires du monde entier. En gros, le GIEC effectue une revue de presse d'un genre très particulier : il examine et synthétise ce qui s'est publié dans la littérature scientifique sur la question de l'influence de l'homme sur le climat (et par voie de conséquence sur le fonctionnement du climat, avec ou sans hommes) , C'est un point important, car tout chercheur travaillant dans un des [domaine concernés](#) - même quelqu'un qui tenterait de remettre en cause l'influence de l'homme sur le climat - verra ses travaux pris en compte dans le cadre des procédures d'expertise organisées par le GIEC dès lors que cela a donné lieu à publication dans une revue scientifique (par contre le GIEC ne tient aucun compte, et c'est normal, de ce qui est publié dans la presse "ordinaire", sur les sites internet, etc ; seules les revues scientifiques à comité de lecture ou les travaux en cours dans les laboratoires de recherche sont pris en compte).

L'organe suprême du GIEC est son assemblée générale, où chaque pays membre dispose d'une voix (Le Luxembourg - 450.000 habitants - y pèse donc autant que les USA ; c'est le principe de toutes les assemblées onusiennes). C'est l'assemblée générale qui définit le programme de travail que le GIEC devra suivre, c'est à dire les domaines où il devra faire la synthèse des travaux publiés ou en cours, et c'est elle qui approuve les publications les plus importantes, appelés rapports d'évaluation et dont je précise l'élaboration ci-dessous.

L'organe exécutif du GIEC est le bureau (comme pour une association), élu par l'assemblée générale. Le GIEC dispose de son propre budget. Le GIEC est subdivisé en 3 groupes de travail qui ont la charge de conduire les expertises sur :

- Les travaux publiés ou en cours qui portent sur le fonctionnement "physique" (et chimique !) du climat et les variations climatiques passées ou à venir ([groupe 1](#)).
- Les travaux publiés ou en cours qui portent sur la vulnérabilité de la biosphère et de notre système socio-économique face aux risques du changement climatique ([groupe 2](#)).
- Les travaux publiés ou en cours sur les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et la manière de réduire nos émissions ([groupe 3](#)).

A côté de rapports d'évaluation très détaillés, qui sont les documents les plus importants (dites publications officielles), le GIEC fournit également des rapports plus succincts sur des points particuliers (la contribution des avions, ou celle des changements d'usage des sols, ou encore les risques de phénomènes brusques et discontinus....) qui ne sont pas formellement approuvés par l'AG mais qui sont élaborés avec le même genre de procédure que les publications officielles.

Comment se passe l'élaboration des rapports d'évaluation du GIEC ?

Un rapport du GIEC démarre toujours de la même manière : par un vote de l'assemblée générale, sur proposition du bureau. Cette proposition du bureau consiste en un sommaire prévisionnel (toutes les têtes de chapitre sont déjà prévues) des futurs rapports à remettre (un par groupe). Une fois ce programme approuvé, le bureau du GIEC sollicite comme auteurs, auprès des pays membres, des experts des domaines couverts. A raison de plusieurs dizaines d'auteurs par tête de chapitre, chaque rapport nécessitera donc la contribution de plusieurs centaines de rédacteurs, sans compter ceux plus nombreux encore qui feront part d'un avis sur les projets.

L'architecture d'un rapport d'évaluation est la suivante : chaque chapitre d'un rapport traite d'un domaine particulier (par exemple les propriétés physiques des [gaz à effet de serre](#), ou encore la qualité de représentation des phénomènes physiques dans les [modèles](#), les [variations climatiques du passé](#), la [part probable des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine dans l'augmentation de température depuis le début du siècle](#), etc), et les auteurs du chapitre en question sont chargés de faire la synthèse des connaissances scientifiques disponibles sur ce sujet.

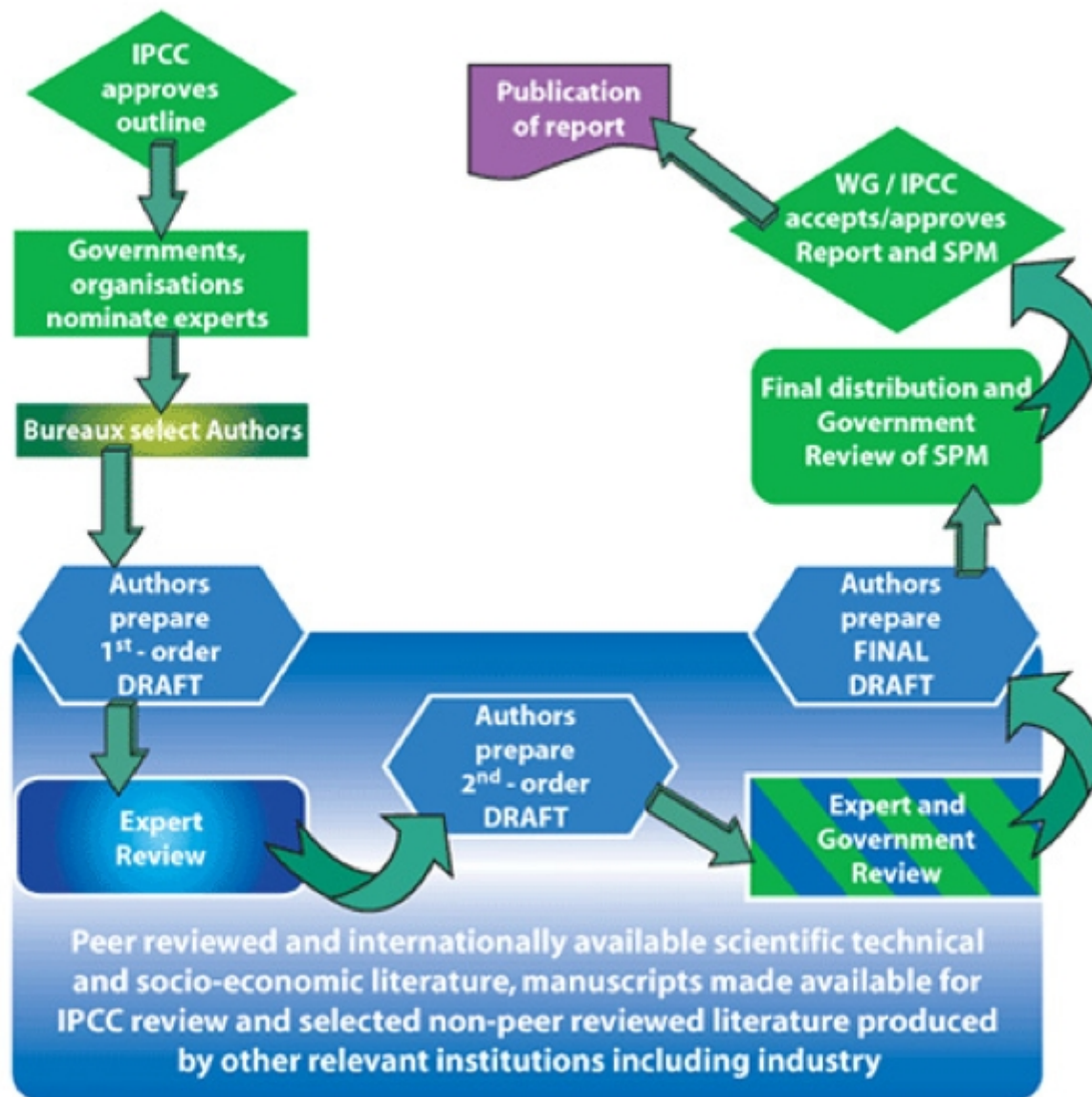
Ce qui leur est demandé n'est pas de donner un avis "comme ça" : ils effectuent un long travail de compilation de tous les travaux publiés dans la littérature scientifique spécialisée, ou ceux en cours dans les laboratoires de recherche. Par exemple la tête de chapitre intitulée "évaluation des modèles" (qui fait partie du [rapport du groupe 1](#)) est rédigée par des spécialistes de la [modélisation](#) qui analysent les centaines d'articles publiés dans la littérature scientifique sur l'évaluation des modèles (c'est-à-dire tous les articles scientifiques qui regardent si les modèles reproduisent correctement ou non tel ou tel processus du système climatique réel). La bibliographie est donnée à la fin de chaque chapitre.

Ces synthèses sectorielles permettent de produire un premier projet de rapport, qui sera lu et commenté par d'autres experts des disciplines couvertes, ce qui conduira à une deuxième mouture qui sera soumise aux mêmes relecteurs ainsi qu'à des représentants des gouvernements de tous les pays membres du GIEC. C'est seulement après ces

allers-retours, très formalisés, qu'un document définitif est soumis à l'assemblée générale du GIEC pour approbation avant publication.

Au total, plusieurs milliers d'experts - généralement des chercheurs de renom, mais le processus est ouvert à qui veut, voir plus bas - sont impliqués dans les processus de rédaction et d'expertise organisés par le GIEC. Les disciplines couvertes concernent à la fois des sciences "dures" (physique, chimie, biologie...), au travers de multiples spécialités (voir [quelques exemples](#)) et aussi des sciences "moins dures" : on y trouve aussi des économistes, des sociologues...

Le schéma ci-dessous résume ce "parcours du combattant" du futur rapport d'évaluation (source GIEC). C'est en anglais, désolé !



Il est essentiel de noter que, avant d'être publiés et déclarés "documents du GIEC", les rapports d'évaluation sont explicitement approuvés en assemblée plénière du GIEC. **A ce jour, toutes les publications officielles du GIEC ont été approuvées à l'unanimité par les pays représentés dans l'assemblée du GIEC (y compris les USA, ou l'Arabie Saoudite).**

Le premier rapport d'importance date de 1990, qui donnait déjà des conclusions fortes concernant le changement climatique futur. Un deuxième rapport détaillé a été remis en 1995 et un troisième en 2001 ; le quatrième et dernier à ce jour est paru en 2007. Les documents produits par le GIEC servent de référence dans le cadre des [négociations internationales](#) sur les gaz à effet de serre, mais, pour ne pas prêter au mélange des genres, le GIEC n'est pas officiellement représenté à ces négociations.

Le GIEC dispose d'un site Internet (www.ipcc.ch) où sont proposés en plusieurs langues, dont en Français :

- des résumés pour décideurs, qui synthétisent les grands axes et les principales conclusions de ce qui figure dans les rapports complets (ces résumés pour décideurs sont même approuvés mot à mot par les assemblées plénières),
- le texte complet du 4^e rapport d'évaluation,
- les textes de certains rapports autres que les rapports d'évaluation,
- des contributions de divers groupes à des rapports à venir, ou encore des documents faisant le point sur un problème particulier (par exemple ce que l'on sait sur les phénomènes climatologiques à effet de seuil) appelés "technical papers".
- des documents précisant le programme de travail en cours.

Les rapports complets **sont tous publics**, et peuvent tous être téléchargés sur le site du GIEC.

Faut-il croire le GIEC ?

Voilà la question intéressante ! Arrêtons tout de suite le suspense : la réponse est oui.

Les publications officielles du GIEC ont pour seul objet de proposer une synthèse des connaissances scientifiques, qui comprennent à la fois les points qui font consensus et ceux qui font encore débat, sans oublier les incertitudes attachées aux résultats présentés. Ils sont le fruit d'un long débat contradictoire entre experts, qui sont les seuls à même de savoir si une incertitude est gênante ou pas pour formuler une conclusion générale. L'assemblée générale du GIEC, où chaque pays du monde qui dispose d'au moins un scientifique compétent sur le sujet l'y envoie, a toujours approuvé à l'unanimité les rapports d'évaluation publiés.

On peut donc considérer que **tout ce qui fait l'objet d'un consensus dans les rapports du GIEC peut être tenu pour une certitude**. Il en va ainsi, en particulier, des conclusions suivantes :

➤ la concentration de l'atmosphère en CO₂ est plus élevée qu'elle ne l'a été sur les 650.000 dernières années,

➤ cette augmentation va entraîner un changement climatique dont l'une des caractéristiques (mais pas la seule) sera une augmentation de la température moyenne de la planète au niveau du sol. C'est l'ampleur de ce réchauffement qui demeure un objet de débat, mais pas le fait que globalement le climat va changer et en particulier la moyenne des températures va monter.

Dès lors, que penser des quelques individus qui se précipitent de temps à autre devant les caméras ou dans les colonnes de journaux grand public pour contester "les conclusions des scientifiques" ? On peut en dire ceci :

➤ La première chose est que **le processus d'expertise du GIEC est ouvert à tout scientifique désirant faire des remarques, et qu'il est précisément prévu pour que la contradiction soit gérée entre personnes qui ont les moyens de comprendre de quoi il retourne**, et non portée devant un grand public qui n'est pas armé pour y retrouver ses petits. Il ne s'agit pas d'un lieu où se fomentent un complot !

➤ Le débat contradictoire est une composante normale de l'activité de n'importe quel scientifique, mais une personne qui est un chercheur compétent pour une discipline donnée procède toujours de la manière suivante pour remettre en cause une théorie généralement admise : elle commence par soumettre au jugement de ses pairs, en publiant dans une revue scientifique spécialisée (où les articles sont examinés par d'autres spécialistes avant publication), un article détaillé indiquant pourquoi l'idée que l'on se faisait jusqu'à maintenant est erronée, présentant les travaux qu'ils ont menés pour arriver à cette conclusion, et selon quel

raisonnement - et quelle confirmations par l'observation ou l'expérience - les résultats le conduisent à proposer une autre explication. **Jamais il ne commencera par se précipiter devant les caméras ou dans les journaux grand public pour exposer ses vues : comme il n'y a pas de processus de validation par des individus compétents, de telles publications ne seront jamais portées à son crédit par ses pairs.**

➤ A quelques exceptions près (mentionnées ci-dessous), la totalité des "contestations" que j'ai vues à ce jour dans la presse grand public émanait de personnes qui n'ont aucune compétence particulière sur le sujet du changement climatique. Concrètement, les "contestataires" que j'ai vus appartenaient tous à l'une des catégories suivantes :

➤ des auteurs non scientifiques dont la lutte contre le changement climatique contrarierait les intérêts personnels ou les thèses qui leur sont chères. Cela inclut des "ultra-libéraux", par exemple Guy Sorman, ou Philip Stott (signataire d'un [article du Wall Street Journal qui est un bijou en matière d'inepties](#)), des anti-nucléaires (le nucléaire est une [composante possible](#) d'une politique de diminution forte des émissions de gaz à effet de serre ; cet élément intervient probablement pour [Yves Lenoir](#)), des individus dépendant d'un secteur d'activité fortement consommateur d'énergie fossile (charbonniers, pétroliers, mais aussi aciéristes ou chimistes...)...

➤ des universitaires ou des ingénieurs qui relèvent d'une spécialité qui n'a pas de lien particulier avec la question de l'influence de l'homme sur le climat (tous les "scientifiques" ne sont pas indifféremment compétents dans tous les domaines, tout comme n'importe quel médecin n'est pas compétent pour parler de greffe des orteils, ou tout garagiste n'est pas apte à changer un tuyau sur la fusée Ariane !) mais qui s'expriment quand même pour des raisons diverses (ego personnel, rôle politique, pression des journalistes ou de certains éditeurs qui cherchent des contradicteurs...).

Ce cas concerne par exemple les propos tenus par [Claude Allègre](#) ou, un moment, par Haroun Tazieff, ou aujourd'hui Bjorn Lomborg (qui est universitaire ; il est statisticien), dont on peut lire sur ce site [une recension sur ses écrits sur le changement climatique](#).

➤ des scientifiques qui ne contestent pas le moins du monde les conclusions du GIEC, mais dont un savant montage audiovisuel ou journalistique a abouti à leur faire dire une bêtise, sans que ce soit nécessairement le but recherché du reste. Quand, après 1 heure d'entretien, si ce n'est plus, seules 2 phrases - ou 3 minutes - sont reprises dans le journal ou à la télé (cas très fréquent),

d'une part ce n'est pas l'interviewé qui les a choisies mais bien le journaliste (c'est donc ce dernier qui choisit ce qu'il va faire dire à l'intéressé), et d'autre part la personne interrogée ne pourra pas nécessairement se relire (ou se revoir pour la télé). Cela favorise incontestablement les contre-sens.

►des manifestations de mauvaise foi diverses, pouvant éventuellement concerner un "scientifique compétent". Un éminent spécialiste du MIT, Richard Lindzen, a ainsi beaucoup contribué à jeter le trouble en faisant publiquement part de réserves exposées de telle façon que l'on pouvait facilement les prendre pour une remise en cause globale du dossier. Après que la source de sa mauvaise humeur ait été éradiquée (il était probablement vexé de ne pas être auteur du premier rapport du GIEC en 1990, mais il est auteur du rapport 2001), il a co-signé (en juin 2001) un rapport de l'Académie des Sciences Américaine où il reconnaît que le GIEC fonctionne bien et que son rapport d'évaluation reflète parfaitement l'état de la science sur le sujet. De telles "manifestations de mauvaise humeur" peuvent aussi concerner des chercheurs qui ont envoyé des contributions lors du processus d'expertise et qui estiment ne pas s'être vu accorder l'importance qu'ils méritaient (cela arrive, bien sûr).

►de journalistes qui ont compris de travers ce qu'il y avait dans les publications du GIEC. Les rapports d'évaluation ne sont pas des documents faciles à lire : ils sont en Anglais, font 800 pages, et il s'agit bien de littérature scientifique, contenant à chaque page des termes tels que "the effects of fresh water pulse on AABW formation", ou encore "AVHRR-derived albedo estimates can now be mapped".... En France, je suis bien persuadé qu'il n'existe pas un seul journaliste de la [presse grand public](#) qui ait lu l'intégralité du [rapport du groupe 1](#), ni même deux chapitres *in extenso* en ayant tout compris. Quand un journaliste vous parle de ce document, il le fait sans l'avoir lu : cela peut entraîner quelques effets indésirables !

►de journalistes qui rapportent une contestation sans savoir si elle est valable parce que "il faut toujours un pour et un contre" (beaucoup de journalistes ont horreur des vérités universelles, même quand elles existent pourtant, ce qui n'arrive pas souvent avec les hommes, qui constituent leur pain quotidien, mais arrive parfois en sciences : $2+2$ font toujours 4 ; doit-on donner de l'audience à quelqu'un qui soutiendrait que $2+2=3$ simplement pour "diversifier les points de vue" ?). Cet amour de la presse pour les contradicteurs sans savoir s'ils tiennent des propos fondés a certainement joué un rôle central dans l'essor de tous les "contestataires" dont j'ai entendu parler.

►de personnes qui ne lisent que le journal et s'inspirent pour leur propre production littéraire d'un journaliste qui a compris de travers : ils expliquent par exemple que telle conclusion est fausse, alors qu'elle ne figure pas dans les rapports du GIEC, mais seulement - et abusivement - dans l'article utilisé comme source documentaire.

J'en tire du reste mon seul conseil pour ceux que ce phénomène intéresse : **ne prenez jamais un article de journal grand public comme référence documentaire valable**, remontez aux [documents qui sont à la source](#). Tous ceux qui ont été en position de comparer ce qu'ils savent d'un phénomène technique ou complexe et la manière dont les faits sont généralement rapportés dans la presse me comprendront sûrement !

Enfin il faut savoir que tous les "contre-arguments" qui se placent sur le terrain de la science sont connus depuis bien longtemps des [scientifiques compétents](#) puisqu'ils sont précisément examinés et discutés dans les rapports d'évaluation.

En conclusion, une personne qui n'est pas un scientifique travaillant directement sur le sujet - ce qui est mon cas, je n'ai fait que lire une bonne partie des rapports et rencontrer une [petite partie des scientifiques travaillant sur le sujet](#) - n'est pas capable de porter un jugement technique sur un domaine qu'il ne connaît pas (je ne me permettrai pas de juger du sérieux des mesures qui ont été faites sur les carottes de glace : sur quelle base pourrais-je le faire ?). Tout au plus pouvons nous nous poser ces deux questions simples mais essentielles :

►plusieurs milliers de scientifiques de haut niveau, parfaitement respectés par ailleurs (ils comportent des Académiciens de très nombreux pays, par exemple...), ont-ils des raisons particulières de nous raconter sciemment des salades à l'occasion d'un tel cas de figure ? C'est doublement improbable :

►les résultats sur lesquels ils s'appuient sont parfaitement admis dans d'autres cadres,

►il n'y aurait pas de mobile au crime. L'argument de crier au loup pour avoir des crédits de recherche, entendu parfois, peut sembler recevable a priori, mais il se trouve qu'en Europe, c'est exactement le contraire qui se produit : plus le dossier semble solide, et plus la puissance publique a tendance à considérer que "on en sait assez comme cela et ce n'est pas la peine de financer d'autres recherches". Et aux USA, avec le gouvernement actuel, ce seraient probablement plus les scientifiques qui cherchent à remettre le dossier en cause qui auraient des facilités financières !

Au surplus, cet argument pourrait éventuellement fonctionner pour quelques personnes, mais que des milliers de chercheurs, qui sont des gens assez honnêtes par nature, issus de [dizaines de disciplines différentes](#), aient cette même idée en tête en même temps semble totalement improbable. En tous cas, spéculer là-dessus pour penser que nous n'avons pas à nous faire de souci est un pari que je ne prendrais pas.

➤que risque-t-on à ne pas les croire ? On [risque d'y laisser une planète confortable](#), et la peau d'une fraction de nos descendants, ce qui n'est pas rien...

Faut-il croire tous ceux qui s'expriment sur le climat ?

octobre 2002

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Périodiquement, des personnes signent des articles ou des livres, généralement virulents, exposant que toute cette affaire de réchauffement n'est qu'une chimère de scientifiques et que le plus urgent est de ne pas prêter attention à toutes ces mises en garde. Ils ajoutent souvent que de lutter contre le changement climatique va "coûter très cher" et donc que nous devrions nous dépêcher de nous occuper d'autre chose.

Je vous propose ici quelques commentaires sur quelques unes de ces publications. Avant de lire l'une de ces critiques, je vous conseille vivement de regarder au préalable :

➤la page sur le [GIEC](#), qui expose comment se fait la synthèse des connaissances scientifiques, et quelques éléments sur la confiance que l'on peut accorder au processus,

➤la page exposant [qui sont les "scientifiques"](#), et s'il est possible de les soupçonner d'être à la solde des écologistes.

Enfin quelques ouvrages "contestataires" ne figurent pas ci-dessous, mais ce n'est que faute d'avoir eu le temps de rédiger un commentaire, qui serait à peu près du même tonneau que ceux que vous pourrez trouver ici. Cela concerne notamment :

➤ Le progrès et ses ennemis de Guy Sorman, que j'ai acheté, lu, et qui est assez proche du livre de [Fourçans](#),

➤ L'imposture verte de Pierre Kolher, que je n'ai pas acheté, parce que je lis trop souvent que de bons chiffres de vente signifient qu'il y a un fonds de vérité, mais que j'ai feuilleté en librairie, et qui est lui aussi bâti sur le postulat que les discours des militants écologistes ou des journaux reflètent fidèlement les déclarations des scientifiques (ce qui n'est pas le cas). En outre il contient quelques perles savoureuses qui sont probablement le reflet du niveau de connaissances scientifiques de l'auteur (il paraît que si la glace flotte sur l'eau, c'est parce qu'elle contient des bulles d'air !!!),

Le lecteur notera que nulle part ailleurs sur mon site je ne prétends être en mesure de confirmer ou d'infirmer la validité des informations de nature scientifique qui sont exposées : je n'ai personnellement jamais calculé ou mesuré le rayonnement solaire à la surface de l'atmosphère, ni la vitesse des courants marins, ni vérifié la couverture forestière de la planète, ni analysé moi-même les carottes de glace de l'Antarctique, ni manipulé un spectromètre de masse, sans oublier d'avoir vérifié l'étalonnage des appareils de mesure...

En conclusion, je me contente de reproduire ce que j'ai pu lire **dans des publications scientifiques** (dont le [rapport 2001 du GIEC](#)), et de donner mon avis sur la cohérence de ce que j'ai pu comprendre, mais me sentirais bien en peine de contester quoi que ce soit. Tout au plus puis-je me risquer à une petite mise en perspective ou à un commentaire quand les résultats me sont directement accessibles. D'autres se sentent en mesure de contester, tels les auteurs ci-dessous ; je les soupçonne de ne pas être de la meilleure foi du monde !

Et maintenant, passons aux choses sérieuses : en cliquant sur le titre vous accéderez à la critique.

Titre de la publication	Auteur(s)	Année parution	Nb pages	prix (approx.)	Editeur	Niveau minimum à mon sens
Ma vérité sur la planète	Claude Allègre	2007	240	18E	Plon	Tous publics
Le Monde du 26 octobre 2006	Claude Allègre	2006	article de revue	-	-	Tous publics

<u>Etat d'urgence</u>	Michael Crichton	2006	650	22E	Robert Laffont	Tous publics
<u>Ecologiquement incorrect</u>	Eric Joly	2004	210	17,5 E	Jean-Cyrille Godefroy	Tous publics
<u>Climat, la fausse menace ?</u>	Jean-Paul Croizé	2004	180	16 E	Carnot	Tous publics
<u>The Skeptical Environmentalist</u>	Bjorn Lomborg	2002	60 pour la partie climat	non publié en France	non publié en France	(Très) bon connaisseur du sujet
<u>Effet de serre, le grand mensonge ?</u>	André Fourçans	2002	128	14 E	Le Seuil	Tous publics
<u>Le Point de septembre 2002</u>	Hervé Ponchelet et Olivier Hertel	2002	article de revue	-	-	Tous publics
<u>Climat de Panique</u>	Yves Lenoir	2001	214	19 Euros	Favre	(Très) bon connaisseur du sujet
<u>Le Wall Street Journal d'avril 2001</u>	Philip Stott	2001	article de revue	-	-	Tous publics

Et en prime, [une lettre ouverte au président d'Arte](#) envoyée à la suite de la diffusion d'un documentaire intitulé "le temps est-il devenu fou ?" sur cette chaîne le 10 juin 2003.

Les médias et le changement climatique : diffuser correctement l'information, mission impossible ?

dernière modification : février 2007

" L'empire des journaux doit croître à mesure que les hommes s'égalisent. "
Alexis de Tocqueville - De la Démocratie en Amérique, tome II, 1840.

Il est assez fréquent que, à la fin d'une conférence, on me demande comment il se fait que "on ne soit pas au courant" de ce dont je fais état, tellement cela semble énorme. L'abondance des combustibles fossiles peu chers, qui fonde toute notre civilisation moderne, [pourrait prendre fin d'ici quelques décennies](#), et le changement climatique pourrait [peser gravement sur le confort de vie - voire sur la survie - de nos \(arrière-\)petits enfants](#), et "cela ne serait pas dans le journal" : comment est-ce possible ? Bien évidemment, une fraction de l'assistance commence alors à chercher des embryons d'explication - ou des coupables possibles ! - et plusieurs suppositions reviennent très souvent dans les propos :

- les [scientifiques](#) ne font pas ce qu'il faut pour que le dossier soit suffisamment vulgarisé,
- les politiques ont peur de tenir le "discours vérité", et "ils savent" mais n'en disent rien.

Ce qui m'étonne le plus, ce n'est pas que ces deux affirmations soient largement infondées. Le changement climatique offre un rare exemple de tentative de transfert de connaissances organisé à une très large échelle, via le [GIEC](#), entre le [milieu scientifique](#) et le milieu des "décideurs" (on ne peut donc pas accuser les scientifiques de ne pas "faire ce qu'il faut"), et - malgré cela, pourrait-on dire - l'immense majorité des politiques que j'ai croisés ou pour lesquels j'ai des informations de première main ne sait rien - ou pas grand chose - du dossier énergétique-climatique (c'est vrai à gauche comme à droite).

Non, ce qui m'étonne le plus, c'est que les média soient très souvent oubliés quand on s'interroge sur la transmission de l'information, alors que c'est précisément leur rôle ! Car, en effet, qui a pour fonction de faire passer l'information d'une population de scientifiques et d'experts, qui fait quelques centaines de personnes pour la France, et quelques dizaines de milliers à l'échelle de la planète, à la population dans son ensemble, qui représente 100.000 fois plus, et dont les élus ne sont que les représentants, généralement pas mieux informés que la moyenne ?

Une anecdote illustrera mieux que de longs discours cet oubli fréquent des media dans la manière dont nous sommes informés. Je me rappelle avoir lu, il y a quelques années (j'ai hélas perdu la référence exacte), le résultat d'un sondage où l'on demandait aux Français à qui ils faisaient confiance pour les informer. Les ONG recueillaient 80% d'opinions positives, et la presse (ou les media, je ne sais plus), plafonnaient à 30%. Mais, me suis-je demandé à l'époque, par qui les Français sont-ils informés de la position des ONG....si ce n'est par les média ?!?! La bonne logique aurait donc voulu que ce que racontent les ONG dans les media ne soit pas crédité d'un taux de confiance supérieur à celui accordé à "la presse" en général.....

Peut-on se passer des journalistes pour parler de changement climatique ?

Il est bien sûr possible de faire passer de l'information sur le sujet sans être directement dans le journal, et d'aucuns ne s'en privent pas :

➤ On peut faire des conférences (cela tombe bien : [j'en fais](#) !). Supposons que je fasse une conférence par semaine (moins 6 semaines de vacances par an, quand même), pour un public moyen de 100 personnes, ce qui est [à peu près le rythme actuel](#). A ma mort, disons dans 40 ans, j'aurai parlé en direct à $40 \text{ (ans)} \times 46 \text{ (semaines par an)} \times 100 \text{ (personnes par conférence)} = 180.000$ personnes environ, c'est à dire moins du cinquième du lectorat moyen d'un quotidien national. Il faudrait que je fasse plus de 2.000 ans de conférences pour toucher 10 millions de personnes, que le 20 heures de TF1 touche - en moyenne - tous les jours de la semaine !

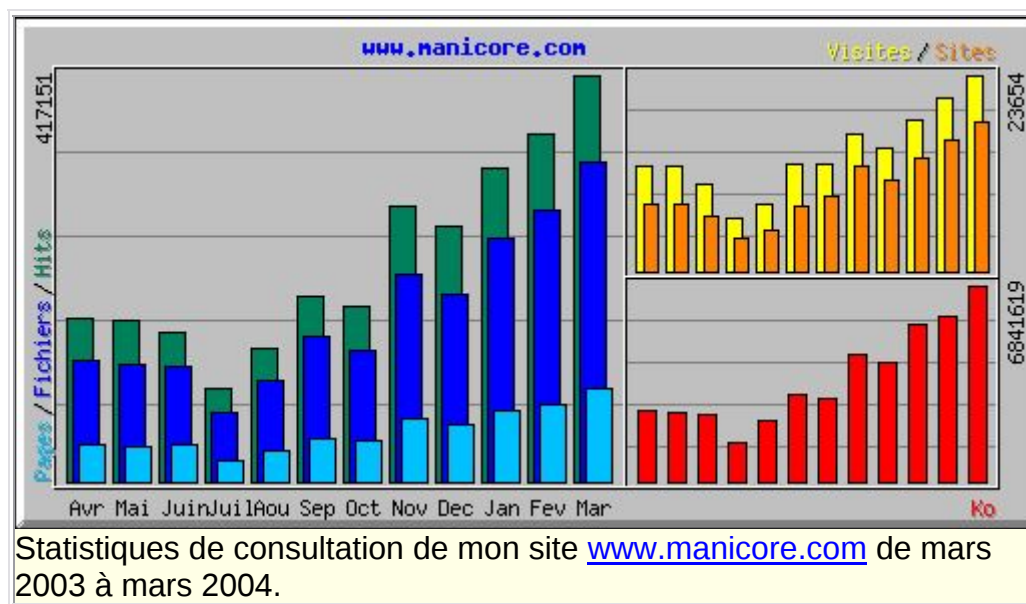
Si chaque expert du changement climatique en France (admettons que je m'auto-adjuge ce titre, puisque tout le monde semble vouloir me le coller sur la bobine) fait de même, nous arriverons, sur toute la durée d'une vie, à une population touchée qui ne représente que le lectorat cumulé de quelques quotidiens pour un jour de semaine.

➤ On peut écrire un livre. Je l'ai aussi fait ; j'en ai même écrit l'équivalent de 2 (L'[Effet de Serre](#), dont j'ai écrit "la moitié" aux côtés d'Hervé Le Treut, et qui compte donc pour 0,5, L'[Avenir Climatique](#), et [Le Plein s'il vous Plait](#), dont j'ai écrit "la moitié" aux côtés d'Alain Grandjean, et qui compte donc aussi pour 0,5), ce qui démultiplie un peu, en théorie, la diffusion directe de l'information. Toutefois la vente cumulée de ces ouvrages est de l'ordre de 25.000 exemplaires à ce jour, ce qui ne correspond pas encore à une fraction notable de la population francophone (car mes (co-)oeuvres se vendent ailleurs qu'en France, si si). Il y a en

outre des lecteurs communs aux trois livres, et aussi un fort recouvrement avec les gens que j'ai en face de moi lors de conférences.

Là encore, si chaque expert fait un bouquin (hélas [la production est bien plus faible](#)), nous allons atteindre 100.000 à 200.000 lecteurs au maximum (car il y a encore et toujours des recouvrements), soit moins de 0,3% de la population de notre pays : comme "diffusion large", on fera mieux.

➤ Il est loisible de construire un site Internet, et cela aussi, j'ai essayé : on peut ! Cela amène un "lectorat" plus important que les deux moyens cités ci-dessus. Mon modeste site a franchi la barre des 6.000 visiteurs quotidiens pour la première fois en février de l'an de grâce 2007, et en régime de croisière ma prose réticulaire voit passer de l'ordre de 100.000 masochistes par mois (3 à 4000 par jour).



A raison de 4 pages vues par visiteur, cela me permet donc de diffuser environ 500.000 pages par mois en moyenne, ce qui représente à peu près 2.000 "équivalent bouquin" par mois (avec un bouquin à 250 pages), soit 2 à 3 fois plus que le livre

"papier". Cela étant, à la différence du livre, il y a des visiteurs qui reviennent plusieurs fois par mois, et qui reviennent même d'un mois sur l'autre : la population que je touche réellement ne se monte donc sûrement pas à 100.000 francophones par mois, et même par an ce n'est pas certain.

Bien sûr je ne suis pas le seul à faire un site Internet, mais là encore on ne prête qu'aux riches : il y a très certainement un recouvrement significatif de mon "audience" avec les audiences des autres sites qui proposent de la vulgarisation sur le changement climatique.

En comparaison, environ 50% des Français de plus de 15 ans lisent régulièrement un quotidien, national ou régional (IPSOS, 2001). 4 titres dépassent les 2 millions de lecteurs quotidiens : L'Equipe (2,5 millions), Ouest France (2,2 millions), Le Monde (2,2 millions), et Le Parisien (2 millions avec la diffusion de Aujourd'hui en France). Et le journal télévisé de 20 heures de TF1 enfonce tout le monde, avec 10 millions de téléspectateurs quotidiens, devant celui de France 2 (environ 6 millions de téléspectateurs).

Il est donc évident que la grande majorité de mes concitoyens ne vont s'informer sur ce sujet, toute leur vie durant, qu'en lisant le journal, en écoutant la radio, ou en regardant la télévision. En d'autres termes, **l'essentiel des électeurs français** (et cette conclusion peut probablement s'appliquer à l'ensemble des habitants de la planète) **n'aura jamais rien d'autre, comme information sur le changement climatique et l'énergie, que ce que les journalistes en charge de ce sujet dans les divers media auront souhaité - ou pu - leur dire.**

Qui s'intéresse à la diffusion large de l'information doit donc se demander, **avant tout**, si les journalistes font correctement la synthèse des éléments disponibles. Ont-ils pris le temps (ou ont-ils eu le temps) de bien comprendre ce qui leur est expliqué ? Nous présentent-ils les faits, ou leur conclusion personnelle à partir de ce qu'ils en ont compris ? Si c'est une conclusion qu'ils nous proposent (ce qui est en fait très souvent le cas), cette dernière est-elle basée sur une investigation suffisamment approfondie, ou bien se base-t-elle sur une information partielle, voire sur quelques slogans de-ci de-là ? Comment savoir, vu de l'extérieur, dans quelles conditions s'est faite l'élaboration de l'information ? Et enfin, quand le sujet traité comporte un volet technique important (ce qui, en matière d'[énergie](#) et de [changement climatique](#), est assurément le cas !), la formation - ou la culture - de nos amis des media leur permet-elle d'être à l'aise dans la manipulation des informations qu'ils ont à traiter ?

Je n'ai bien sûr pas la prétention d'apporter une réponse définitive à toutes ces questions, et ici comme ailleurs il faut se garder de faire de son expérience personnelle une généralité. En outre le problème étant mondial, il serait logique que je cherche à obtenir des réponses à ces questions (sur la qualité du travail des journalistes) à l'échelle de la planète, et cela ne m'est pas possible. Les quelques éléments de réflexion qui figurent ci-dessous, tirés de ma maigre expérience personnelle, valent ce qu'ils valent pour tenter de faire comprendre les multiples limites de l'exercice en ce qui concerne la vulgarisation du dossier du changement climatique.

Quelques généralités sur le fonctionnement d'un média

La première chose qu'il faut savoir est qu'une rédaction de média - cela vaut pour la télévision comme pour le journal - est avant tout un énorme centre de tri. Une rédaction reçoit quotidiennement beaucoup plus d'informations qu'elle ne peut en traiter (donc en synthétiser), sans même parler de ce qu'elle peut en diffuser, et de ce qu'il "faudrait qu'elle sache" sans avoir le temps - ou l'envie - d'aller l'apprendre (cela vaut particulièrement pour les sujets techniques). Chaque jour, lui parviennent plusieurs centaines - voire milliers - de dépêches d'agence de presse, de communiqués de presse, d'appels de personnes "ayant quelque chose à dire", de lettres ou messages de lecteurs, d'articles de confrères, etc.

A partir de ce flot incessant, la rédaction doit choisir de quels sujets se composera l'édition du jour (ou de la semaine, ou du mois), et de quels sujets elle ne parlera pas (mais doit-on nécessairement parler de censure, quand la raison essentielle est une multiplicité de manques : d'espace, de temps, de compétences ?), l'espace accordé à chaque information évoquée, les personnes qui seront interrogées, ce qui sera retenu de leurs propos, les images qui serviront si c'est à la télévision, les individus qui seront autorisés à publier une tribune ou pas (un journal reçoit de 5 à 20 fois plus de propositions de tribune qu'il n'en publie), et, si c'est une interview, c'est encore la rédaction qui choisit le titre et les phrases mises en exergue.

Il faut savoir, en particulier, qu'une interview n'est malheureusement pas la garantie d'une information délivrée directement "du producteur au consommateur". En effet, lors d'une interview le (la) journaliste recueille souvent bien plus d'informations qu'il ne sera possible d'en diffuser. C'est alors le (la) journaliste qui a réalisé l'interview qui décidera - de manière souveraine - de la

version finale de la rédaction d'un entretien. Il y a bien sûr des journalistes (j'en connais) qui mettent un point d'honneur à faire relire leur transcription, et à ne plus changer une virgule une fois que l'interviewé a validé un texte, mais le cas inverse (texte non soumis à l'accord de l'interviewé, ou remanié en dernière minute sans accord de l'intéressé) se rencontre fréquemment, et, "vu de l'extérieur", le lecteur n'a aucun moyen de savoir [si les propos rapportés sont exactement ceux de l'interviewé](#), ou si ils ont subi une déformation plus ou moins importante lors de la transcription.

Et lors d'une interview pour la radio ou la télévision (journal ou reportage), cette "relecture" n'existe pas, et c'est le (la) journaliste qui décidera seul(e) de ce qui passera à l'antenne. Le téléspectateur - ou l'auditeur - n'a aucun moyen de savoir si cette partie de l'interview qui passera à la radio ou à la télévision représente 2% ou 80% de ce que la personne interrogée a dit devant le micro ou devant la caméra, et le téléspectateur ne sait pas plus comment s'est faite la sélection lorsque l'interviewé a parlé pendant 30 minutes pour 30 secondes qui passeront à l'antenne. Et il faut savoir que quand on sort un petit extrait d'autant de matière première, il n'y a rien de plus facile que de faire dire tout et son contraire à n'importe qui selon la partie sélectionnée et le montage fait.

Avant même d'avoir regardé plus en détail comment se présente la situation dans le cadre particulier du changement climatique, une première conclusion s'impose : la seule existence d'un tri très important - mais inévitable - des informations comporte des effets pervers, tout aussi importants, et tout aussi inévitables. Ainsi, les éléments repris peuvent ne pas représenter grand-chose par rapport à l'information disponible, ils peuvent contenir des contre-vérités, reprises faute de temps pour les détecter, ou simplement parce que la personne qui s'exprime "a une bonne tête", ils peuvent présenter comme essentiels des faits accessoires, ou au contraire ne contenir aucune information sur des points factuellement très importants, etc.

Le dossier du changement climatique est-il simple ?

Soyons sérieux : bien sûr que non. Si nous essayons de donner un premier aperçu de ce qu'il y a dans ce fameux "dossier du changement climatique", nous allons y trouver :

- des informations sur les [processus physiques qui gouvernent le climat](#), et sur la [perturbation que l'homme lui apporte](#),
- des informations sur les [risques liés au changement climatique à venir](#) (à ne pas confondre avec les conséquences déjà observables),
- des informations sur les [activités qui sont à l'origine des émissions de gaz à effet de serre](#), et donc sur les usages de l'énergie et les [pratiques agricoles](#),
- de multiples points de vue sur les éléments de solution qui s'offrent à nous : [économies d'énergie](#), "dématérialisation", [décroissance matérielle](#), [nucléaire](#), [renouvelables](#), etc,
- des réflexions sur la "bonne manière" de s'organiser pour faire baisser volontairement les émissions : [accords internationaux](#), information du consommateur, adaptation possible de la [fiscalité](#), du [système de transports](#), de l'[agriculture](#), réglementations plus ou moins contraignantes pour l'industriel ou le consommateur, etc,

Tout cela commence à faire beaucoup ! Et en outre quelques difficultés supplémentaires sont à surmonter pour nos amis des media :

- pour le dossier scientifique, une large partie des informations publiées sont en anglais, et je ne connais pas l'aisance du journaliste moyen dans cette langue....
- il y a une part importante de vérité scientifique dans la manière de poser le problème (il n'existe pas deux vérités sur les bandes d'absorption dans l'infrarouge du dioxyde de carbone, sur la capacité calorifique de l'eau, ou sur les lois de la mécanique des fluides), mais par contre il n'existe aucune "vérité scientifique" concernant les solutions, ces dernières mélangeant possibilités physiques, faisabilité technique, et surtout acceptabilité sociale (et dans ce dernier domaine il n'existe aucune "vérité scientifique", c'est sûr !),
- il n'existe quasiment pas de [scientifique](#) ayant une vue transversale du problème, car un chercheur est généralement très spécialisé sur une question donnée. Ainsi, si un journaliste demande à un chercheur, qui travaille sur la modélisation du climat, des éléments sur les processus physiques qui façonnent la machine climatique, ou sur leur plus ou moins bonne représentation

dans les [modèles](#), il aura une réponse. Mais s'il poursuit ses questions en demandant quelles pourraient être les conséquences d'une élévation de 3 degrés en moyenne sur l'agriculture, ou si le nucléaire est une bonne idée, le chercheur en question deviendra beaucoup moins bavard, parce que cela ne rentrera plus dans son domaine professionnel direct, voire touchera à un débat de société sur lequel il ne souhaitera pas se prononcer publiquement.

Inversement, l'agronome qui a une idée de la manière dont les végétaux réagissent à tel ou tel type d'agression ne sera généralement pas le plus grand spécialiste de l'évolution future du climat, et ne connaîtra pas nécessairement les informations sur la [disponibilité future en énergie](#), qui conditionne la possibilité d'utiliser des machines ou des engrais de synthèse, etc. Avoir une vue transversale nécessite donc de piocher dans plusieurs dizaines de spécialités diverses, ce qu'un scientifique d'un domaine particulier n'a pas nécessairement le temps de faire (mais il ne saurait être question de le leur reprocher : ils ne sont pas payés pour cela). De ce fait, un(e) journaliste doit comprendre quel type de chercheur est plus particulièrement concerné par quel type de questions, et il n'est pas toujours facile pour eux d'y parvenir.

Toutes ces difficultés sont finalement assez bien représentées si nous examinons d'un peu près la production du GIEC (voir [ce qu'est le GIEC sur une autre page](#)). Tous les 5 ans environ, ledit GIEC produit un rapport de synthèse en 3 tomes, qui présente l'état des connaissances concernant l'[influence de l'homme sur le climat](#) (tome 1), les [impacts possibles du changement climatique](#) (tome 2), et les possibilités d'atténuation du changement climatique induit par l'homme (tome 3).

Ce rapport **ne fait que synthétiser ce qui a été publié dans la littérature spécialisée des années écoulées**, pour en dégager les grandes lignes (voir la [description du processus sur une autre page](#)). Plus précisément, le tome 1 (la [science du changement climatique](#)), qui fait 650 pages pour l'ensemble des 12 chapitres, résume environ 70.000 pages de publications scientifiques diverses (estimation personnelle sur la base de 15 pages par référence citée), c'est-à-dire qu'entre ce qui est publié dans la littérature scientifique et ce qui est écrit dans ce rapport, il a déjà fallu compresser l'information par un facteur 100 !

Le tome 2, qui traite des [impacts et risques possibles du changement climatique](#), est, de ce point de vue, logé à la même enseigne : il résume, en un peu plus de 700 pages environ, de l'ordre de 100.000 pages de publications scientifiques passées. Le tome 3, enfin, qui disserte sur les possibilités d'atténuation du changement climatique, est un peu moins épais, mais nous retrouvons les mêmes ordres de grandeur en ce qui concerne le rapport entre "information initiale" et "information résumée".

Tome	Nombre de pages	Nombre de pages des références citées (estimation personnelle)	"Taux de compression"
Tome 1 du rapport 2001 du GIEC : the science of climate change	645	71 150	110
Tome 2 du rapport 2001 du GIEC : impacts, adaptation, and vulnerability	724	102 100	141
Tome 3 du rapport 2001 du GIEC : Mitigation	563	42 300	75
Ensemble du rapport	1 932	216 000	112

Avant même d'avoir parlé en détail de la [mécanique des traités internationaux](#), des multiples manières de [faire moins d'émissions à titre individuel](#), du "contenu en carbone" de ceci ou cela, du [nucléaire](#), et j'en passe, nous voici donc avec 2000 pages en anglais, synthétisant plus de 200.000 pages de littérature spécialisée, où il n'est essentiellement question que de physique, de chimie, de biologie, et, dans le 3^e tome, d'économie.

Bien entendu, **pas un journaliste de la presse grand public n'a lu ce rapport complet en entier** (et pas un personnage politique de haut niveau en France, et probablement pas plus dans les autres pays occidentaux), ni même une fraction significative d'icelui. A leur décharge, cette lecture - il s'agit de littérature très technique - serait de toute façon très ardue pour l'immense majorité des journalistes français, qui est de formation littéraire (voir plus bas).

Pour tenter de pallier ce problème, le GIEC publie avec chaque rapport un "résumé pour décideurs", qui est lui [disponible en français](#), et qui lui a été lu par un nombre non nul de journalistes (mais je ne jurerais pas que cela dépasse les doigts de quelques mains en France !). Comme ces résumés (un par tome) ne font que 15 à 20 pages (selon le tome), et ne représentent donc que 1 / 4.000^{ème} de l'information contenue dans les publications scientifiques ou techniques prises en considération, ces documents ont fait l'objet de critiques dans le passé, parce qu'ils ne permettent pas de restituer toutes les nuances. Vu le "taux de compression" appliqué, c'est un peu obligé ! L'autre solution, ce serait que chaque "décideur" (et en particulier chaque journaliste) prenne le temps de lire les rapports complets....

Enfin la dernière difficulté à surmonter est qu'il n'est pas facile pour un journaliste de comprendre la nature - et la portée - fort différente de chaque tome :

➤ les deux premiers tomes de ce rapport concernent de la science dure (premier tome), ou "semi-molle" (deuxième tome, qui traite d'écologie - au sens scientifique : étude des écosystèmes, de médecine, de biologie, etc), et surtout restent confinés à l'énoncé du problème,

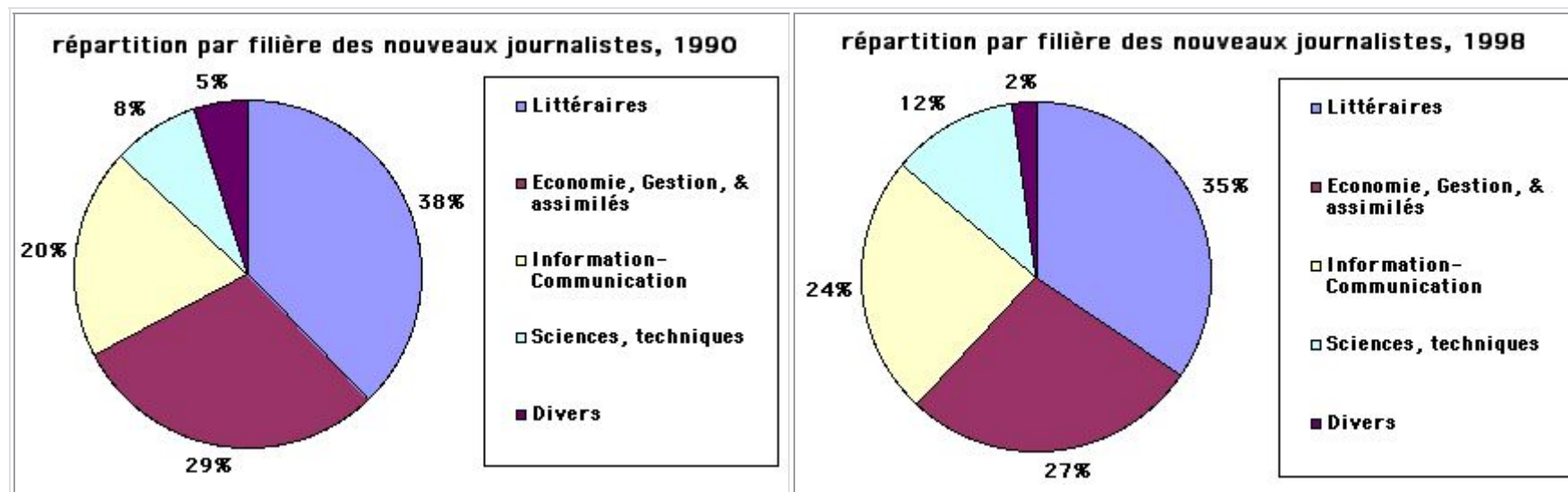
➤ le troisième tome ("mitigation") est de nature très différente : parcourant les évolutions et solutions possibles, il n'évite pas toujours l'écueil qui consiste à bien distinguer projection de prévision, ou encore bien séparer la possibilité physique ou technique d'une solution de son acceptabilité sociale ou économique (étant entendu qu'acceptabilité sociale et acceptabilité économique sont parfois un peu deux manières de poser la même question). On sent qu'il a partiellement été rédigé par des économistes n'ayant pas d'expertise technique poussée sur les sujets évoqués (c'est du moins l'impression que j'ai retirée de la lecture des chapitres concernant les sources d'énergie "sans carbone").

Avant d'expliquer combien nos plumitifs sont des menteurs incompetents, il faut donc bien garder en mémoire que l'exercice qui leur est demandé n'est vraiment pas simple. Finissons ce tour des difficultés avec le fait que l'information est très souvent à mettre en forme du jour pour le lendemain, quand ce n'est pas pour le jour même : la majorité des journalistes qui me contactent et qui travaillent dans un support à parution quotidienne ont besoin de l'information "tout de suite", et parfois l'information qui passera dans le journal ou à la radio n'est pas la meilleure possible, mais tout simplement celle qui était disponible à ce moment-là....

D'où viennent les journalistes (qui parlent éventuellement de changement climatique) ?

La France comptait, en 2003, environ 35.000 journalistes titulaires d'une carte de presse. Je n'ai pas de données sur la formation initiale de tous les journalistes en activité, mais un laboratoire du CNRS a mené en 2000 un travail d'investigation sur la

répartition par filière de formation d'un large échantillon des "nouveaux entrants" pour 1990 et 1998, c'est-à-dire des journalistes qui ont obtenu leur carte de presse ces deux années-là.



Répartition par filière d'origine d'un échantillon des nouveaux titulaires de la carte de presse en 1990 (430 personnes) et en 1998 (380 personnes).

Les filières littéraires désignent les études de Langues, Lettres, Philosophie, Histoire, Géographie, Arts.

Les filières "économie-gestion et assimilés" désignent les études de Commerce, Droit, Economie, Sciences Politiques et Sciences Sociales.

Source : Devenir journalistes, Denis Ruellan & al., La Documentation Française, 2001 (réalisé par l'UMR 6051 du CNRS).

En complément de cette première information, qui est que les journalistes font dans l'immense majorité des études non scientifiques et non techniques, il faut savoir que les débouchés essentiels des profils scientifiques et techniques sont les media spécialisés grand public ou professionnels (journaux de vulgarisation scientifique, informatiques, médicaux, etc).

En clair, les "grands" media nationaux d'information générale, tant écrits qu'audiovisuels, ne comportent quasiment que des journalistes ayant suivi des études littéraires ou économiques pour traiter du changement climatique, où les données scientifiques et techniques sont omniprésentes. Entendons nous bien : rappeler que les journalistes n'ont pas fait d'études scientifiques ne correspond pas à une quelconque volonté de les dénigrer (je serais très mal à l'aise si je devais tenir, demain matin, une rubrique de commentaires des arrêts de la Cour de cassation, ou une rubrique sur l'histoire de la Chine médiévale !), mais le lecteur "a le droit de savoir" que celui ou celle qui est en charge de la transmission de l'information doit souvent manipuler des notions qu'il n'a que très peu abordées pendant ses études, et que ce fait objectif, combiné à des délais de réalisation souvent très courts, est assurément un handicap pour proposer une vue synthétique de la question.

Quels journalistes parlent de changement climatique ?

Très souvent, un journal est organisé comme un gouvernement : les sujets sont affectés par rubrique, exactement comme les problèmes sont affectés par ministère dans un gouvernement, et les journalistes des autres rubriques s'intéressent peu ou pas à la question. On retrouve ainsi dans les média le même cloisonnement que dans un gouvernement, avec un traitement sectoriel de l'information qui gêne, tout autant que dans un gouvernement, une approche transversale des problèmes, qui est nécessaire pour bien comprendre les relations de cause à effet.

En effet, avoir une bonne vision du problème du changement climatique - et des usages de l'énergie - nécessite de comprendre des interactions en très grand nombre (relations entre [alimentation et effet de serre](#), entre [transports et effet de serre](#), entre [croissance économique et effet de serre](#), et même entre assèchement de la rive Sud de la Méditerranée et mouvements migratoires !). Dans la pratique, ces interactions auront du mal à être couvertes par les media, car elles ne "rentrent" pas facilement dans les rubriques qui concentreront l'essentiel des informations sur le changement climatique :

➤ la rubrique environnement,

➤ la rubrique "sciences",

➤ la rubrique "international" (pour les [négociations entre pays](#)).

Les autres rubriques sont en effet très largement absentes dans le traitement de l'information. Par exemple, tout le monde (enfin presque tout le monde !) sait désormais que le transport est une source de gaz à effet de serre. Pourtant, les articles que l'on voit passer sur la construction d'une nouvelle voie routière, d'un nouvel aéroport, de la montée en cadence d'une production automobile, de l'entrée de Renault sur le marché des 4x4, de la production de l'A380, et j'en passe, qui sont traités par des journalistes chargés des transports, de l'industrie des moyens de transports, ou des actualités régionales, sont généralement totalement muets sur les conséquences de l'information principale sur les émissions de gaz à effet de serre, et donc sur le problème climatique.

Il est également rarissime de voir ce sujet apparaître dans la rubrique "économie" (alors qu'[il y a un lien](#) !), et quand c'est le cas cela concerne le plus souvent l'affirmation de bêtises (comme : [lutter contre le changement climatique est "mauvais pour l'économie"](#)), dans les diverses rubriques qui traitent des diverses facettes de la consommation (quel critique gastronomique s'aventurera à déconseiller de manger du boeuf au motif que c'est [un des aliments les plus riches en "émissions incluses"](#) , ou quel journaliste TV rappellera systématiquement les [émissions incluses dans le transport aérien](#) à l'occasion des reportages sur les Jeux Olympiques ?), ou encore dans la rubrique "politique" (qui s'interroge sur les conséquences de chaque promesse électorale sur les émissions de gaz à effet de serre ?), qui sont pourtant toutes concernées au premier chef si l'on regarde les choses d'un peu près.

Ce cloisonnement aboutit assez facilement à un traitement incohérent de l'information, le journaliste en charge du secteur A pouvant très bien dire l'inverse du journaliste en charge du secteur B, le lecteur étant chargé de recoller les morceaux comme il le peut (quand on trouve des conclusions qui disent tout et son contraire, doit-on parler d'information ou de désinformation ?). Plutôt que de me livrer à une longue dissertation, je reproduis ci-dessous un message envoyé au directeur du Monde le 25 janvier de l'an de grâce 2004, et qui illustrera parfaitement le fond de ma pensée (je précise à toutes fins utiles que je n'ai pas eu de réponse, mais ce n'est pas pour cela que je le reproduis !).

Cher directeur du journal Le Monde,

Périodiquement, votre journal s'émeut (...) du manque de

volonté de notre espèce de lutter contre un réchauffement climatique annoncé, qui pourrait amener notre planète à connaître l'équivalent d'un [changement d'ère climatique en 1 ou 2 siècles](#), conduisant alors à une évolution environnementale [sans précédent depuis que notre espèce existe](#).

Tout aussi périodiquement, votre journal expose combien sont désirables les voitures de plus de 200 chevaux (une pleine page dans le Monde daté de ce Dimanche ; de grandes louanges sur la Porsche de je ne sais plus quoi il y a quelques semaines, etc), ou les voyages sous les tropiques (un supplément de 8 ou 9 pages que je n'ai pas gardé il y a 1 ou 2 (?) mois), [toutes choses parfaitement incompatibles avec la nécessaire division par 4 des émissions en France](#) si nous voulons arriver à un début de solution à ce problème. Il ne s'agit pas de morale, mais de physique. (...)

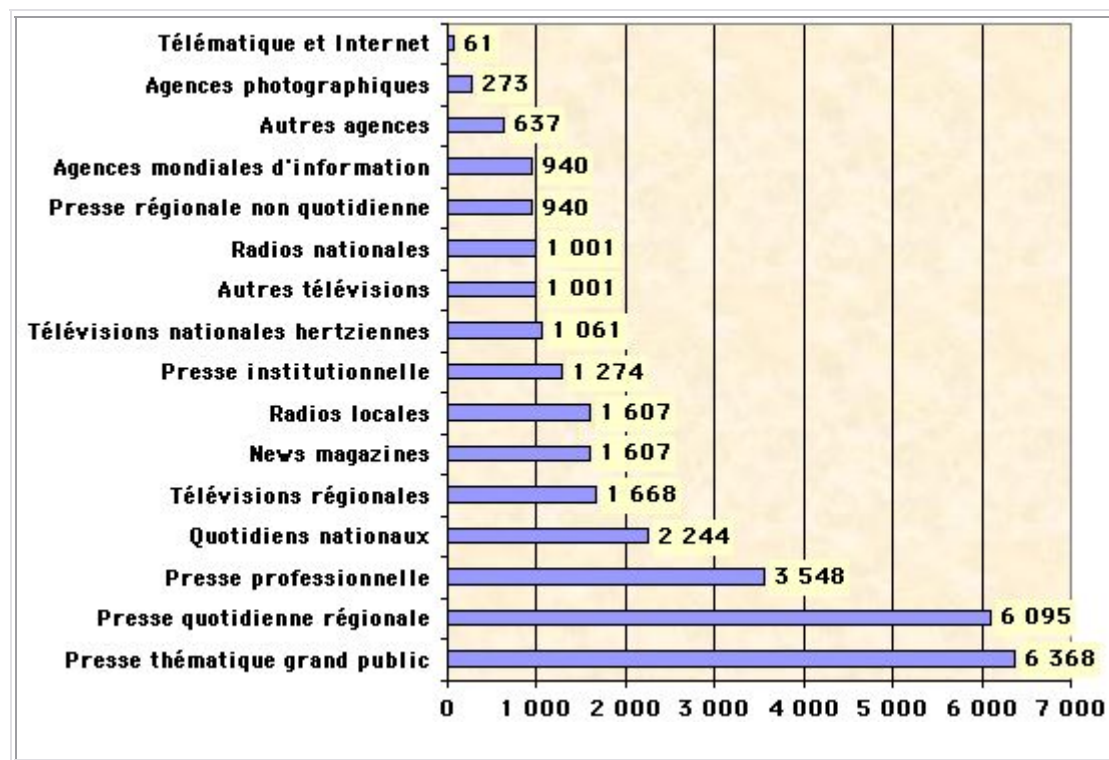
Certes ces pages déplorant les conséquences pendant que nous adorons les causes sont réalisées par des journalistes différents, mais elles seront lues par le même lecteur. Ne croyez vous pas qu'il serait temps de mettre votre rédaction d'accord avec elle-même, afin de cesser d'entretenir la schizophrénie du vulgum pecus, ce qui, pour un journal "de référence", ne devrait pas faire partie du cahier des charges ? (...)

J'aurais pu ajouter que très souvent la publicité véhicule un message parfaitement antagoniste avec les propos tenus ailleurs ou à un autre moment. Pour prendre un exemple en dehors du champ climatique, mais qui aidera à bien comprendre, on peut très bien avoir, à la télévision ou à la radio, une ribambelle de publicités pour des sucreries juste après un documentaire sur l'obésité !
Comprenez alors qui peut....

Combien de journalistes parlent de changement climatique ?

A mon avis, trop peu ! Nous allons voir qu'en fait le traitement de l'information est extraordinairement concentré : en matière de changement climatique, comme pour tout autre sujet, quelques dizaines à quelques centaines de personnes "font l'information" en France.

Comme nous l'avons vu plus haut, il y a en France environ 35.000 journalistes, mais tous ne vont pas parler de changement climatique, bien sûr.



Effectifs des journalistes par media en 2000 (30.325 journalistes concernés par l'enquête).

La presse thématique grand public désigne les magazines féminins, les programmes de télévision, les magazines sur le sport, les voitures, la micro-informatique, etc. La presse professionnelle concerne les journaux s'adressant aux représentants d'une profession donnée (des viticulteurs, des plasturgistes, des transporteurs...). Les News magazines sont les magazines hebdomadaires ou mensuels d'information générale (Express, Nouvel Obs, etc).

Source : Les journalistes français à l'aube de l'an 2000, profils et parcours, Devillard & al., Editions Panthéon Assas.

Sur cet ensemble, environ un quart des journalistes seulement vont travailler dans un support grand public qui va parler un peu fréquemment de changement climatique : agences mondiales, radios nationales, télévisions nationales, news magazines, quotidiens nationaux, et quelques magazines spécialisés (type Science et Vie). Il faut rajouter quelques journalistes suivant un peu la question dans des quotidiens régionaux, mais ils doivent se compter sur les doigts de pas beaucoup de mains, et pour le reste, le changement climatique ce n'est généralement pas vraiment la tasse de thé des magazines féminins (ni masculins !), des programmes de TV, des revues de jardinage, ou même des magazines automobiles....

Si j'en juge par les media d'information générale que je connais, un bon ordre de grandeur est de dire que la rédaction comporte 1 à 3 journalistes en charge des problèmes d'environnement, éventuellement un ou deux journalistes en charge des sciences, et que là s'arrête le gros de l'équipe qui traite du changement climatique. Comme une équipe de rédaction comporte en général quelques dizaines de journalistes, nous avons donc 5% de l'équipe qui, en ordre de grandeur, s'intéresse au sujet. Un tel pourcentage, appliqué à nos 6.850 journalistes ci-dessus, donne un effectif d'environ 350 journalistes qui en parlent plus souvent que les autres.

Mais 350 journalistes, ce n'est pas 350 points de vue indépendants : n'avez vous point remarqué que tous les journaux abordent les mêmes sujets d'actualité en même temps ? En effet, à l'exception - parfois - des grands media nationaux, les autres supports

d'information générale (quotidiens régionaux, notamment) reçoivent souvent l'actualité "non locale" par le biais d'une agence d'information (AFP, Reuters, AP..), en recevant le même dossier de presse envoyé simultanément à toutes les rédactions, ou.... en lisant un autre journal. Ainsi, il n'est pas rare de voir un article dans la presse régionale qui est la copie conforme, à la virgule près, de la dépêche AFP du jour même, ou de la veille, tout comme il n'est pas rare de voir des articles dans plusieurs journaux qui sont assez proches de la recopie de ce qui est contenu dans le dossier de presse diffusé par l'émetteur de l'information. Or citer une agence de presse, c'est citer un autre journaliste : par définition même, c'est de l'information de seconde main.

Il n'est pas rare non plus de voir les media se citer les uns les autres, ce qui rajoute une étape dans la transmission de l'information, et chacun d'entre nous qui a joué au "téléphone arabe" sait qu'après 3 ou 4 intermédiaires l'information à l'arrivée est parfois un peu différente de ce qu'elle était au départ ! Dans le même ordre d'idées, il n'est pas rare de lire un livre dans lequel l'auteur cite un media, de telle sorte que si ledit livre est après cité par "le journal", cela revient, via un crochet par l'auteur du livre, au cas précédent : c'est le journal qui cite un de ses confrères, et nous avons donc deux points de vue qui sont liés l'un à l'autre.

En conclusion, nous pouvons dire qu'il y a, en France, de l'ordre de 300 journalistes pour lesquels le changement climatique fait partie de "l'environnement habituel", soit 1% des journalistes travaillant dans le pays, et qu'en outre seule une fraction de ceux-ci - que je ne connais pas - a un accès direct à une information primaire, les autres citant leurs confrères.

La presse est-elle vraiment indépendante ?

Posez la question à n'importe quel journaliste, et je ne suis pas sûr que vous obtiendrez la même réponse que ci-dessous ! Bien sûr que non, la presse n'est pas indépendante, et cela a aussi une incidence sur le traitement de l'information qu'elle effectue :

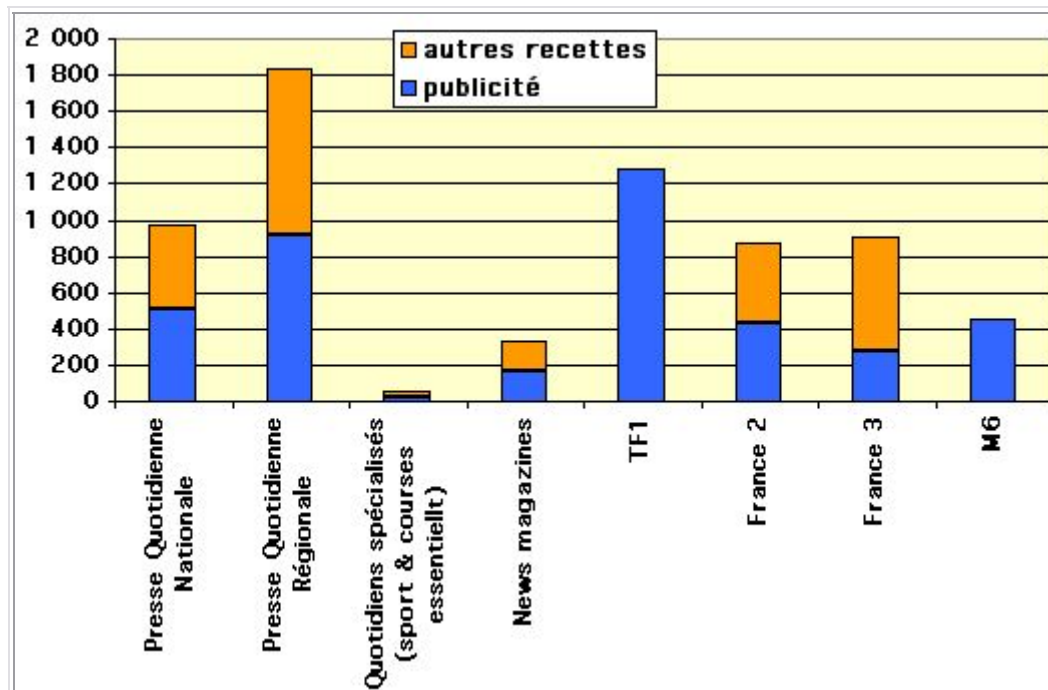
➤ un(e) journaliste n'est pas indépendant(e) de l'espace qui lui est laissé pour s'exprimer, ou réaliser un entretien, ou accorder des tribunes. Sur Internet (comme par exemple sur ce site), ma pagination ne m'est pas comptée : le seul frein est l'indigestion du lecteur, ou mon inspiration défaillante. Mais quand on donne un quart de page à un journaliste, et pas une ligne de plus, ou 30 secondes d'antenne, et pas une de plus, cela conditionne assurément l'information qui peut être contenue. En particulier, cette

parcimonie dans l'espace disponible pousse très fortement à être manichéen (les choses sont bien ou mal, propres ou sales, etc, et la nuance a du mal à s'exprimer) : peut-on considérer que l'on est "indépendant" quand on est forcé de proposer une conclusion réductrice par manque de place, même quand on a fait l'effort de se documenter en profondeur ?

Cette même contrainte de place fait que, lorsqu'une bêtise a été exposée dans le journal en 7654 caractères, il n'est jamais possible de disposer de 7654 caractères pour publier un article rectificatif, de telle sorte que tout le monde gardera en mémoire la bêtise initiale, sauf à avoir aperçu le petit rectificatif publié 3 jours après dans un coin. Et encore il n'est pas possible de publier un rectificatif par conclusion erronée !

➤un(e) journaliste n'est pas indépendant(e) du délai dont il dispose pour rendre sa copie. Lorsque ladite copie est à rendre du jour pour le soir même, cela prédispose, sauf à être un expert très pointu du sujet (et même...), à dire de grosses bêtises : cela peut priver de sources d'informations utiles (par exemple des experts qui ne sont pas disponibles dans la minute) ; cela empêche de se documenter de manière approfondie ou de se faire expliquer ce que l'on a pas compris ; cela peut pousser à considérer comme essentiels les seuls aspects sur lesquels on a eu le temps de se pencher, etc.

➤un(e) journaliste n'est pas indépendant(e) de sa régie publicitaire : on peut dire ce que l'on veut, il y a bien évidemment une limite à la possibilité de mordre la main qui vous nourrit.



Montant des recettes par nature (en millions d'euros, axe vertical) pour différentes catégories de média. On voit que la publicité représente au moins la moitié des revenus pour la majorité des supports d'information les plus influents (même pour la télévision dite publique !), à l'exception de France 3 pour qui elle n'en représente "que" 30% en volume.

Je n'ai malheureusement pas les chiffres pour les radios publiques (les radios privées, ce n'est pas dur : elles n'ont à peu près que la publicité comme recettes !).

Source SJTI (cité dans "Les journalistes français à l'aube de l'an 2000, profils et parcours", Devillard & al., Editions Panthéon Assas.) ; année de

référence 1998 pour la presse écrite et 1999 pour la télévision.

Il y a deux conclusions à tirer du fait que la publicité représente plus de 50% des recettes de l'essentiel des supports majeurs d'information.

► Les recettes publicitaires étant proportionnelles à l'audience, et tout directeur de média cherchant à conserver ses recettes publicitaires, un media est donc obligé d'avoir une ligne éditoriale qui plaise à son audience (déjà Tocqueville le disait, [visionnaire s'il en était](#) !). Peut-on être "indépendant" quand, en première approximation, on ne peut pas souvent dire des choses qui déplaisent au lectorat, même si on a envie de les dire ? Or des choses qui déplaisent potentiellement au lectorat, quand les solutions au changement climatique s'appellent moins conduire, moins utiliser d'énergie pour se chauffer, moins aller en avion sous les tropiques, moins manger de viande, et moins acheter tout ce qui vous passe à portée de la main, il y en a pléthore !

► Le changement climatique étant donc, d'une certaine manière, une scorie de la consommation moderne, souhaiter une action résolue contre cette évolution [revient pour partie à remettre en cause l'augmentation de la consommation matérielle encouragée par la publicité](#). Dans quelle mesure est-il possible de livrer cette conclusion à répétition dans un support qui vit pour une large part avec l'argent des hypermarchés, des fabricants de plats surgelés, des transporteurs aériens et des constructeurs d'automobiles ? Bien des personnes ont également en tête cette citation de Patrick Le Lay, PDG de TF1, contenue dans le livre "Les dirigeants face au changement" (Editions du Huitième jour) : "Nos émissions ont pour vocation de rendre [le cerveau humain] disponible : c'est-à-dire de le divertir, de le détendre pour le préparer entre deux messages [publicitaires]." Je dispose également de témoignages de première main attestant de l'influence très forte d'une régie publicitaire sur ce que l'on peut dire et ne pas dire dans un média. Peut-on encore parler d'indépendance, alors ?

A ce propos, il me semble que le principe "charité bien ordonnée etc", appliqué à la transparence que les media réclament souvent pour les autres, devrait conduire ledits media à exposer clairement qui les paye exactement. Ainsi, je trouverais normal que tous les supports pour lesquels la publicité fournit plus du tiers des recettes totales publient annuellement, de manière visible dans leur rapport annuel, les noms des 20 plus gros contributeurs à leur budget publicitaire. On pourrait ainsi se faire une parfaite idée de l'indépendance de la ligne éditoriale lorsque le sujet touche peu ou prou le domaine des annonceurs. Et si on est vraiment indépendant, qu'a-t-on à craindre - et de qui - à le faire ?

➤ un(e) journaliste n'est pas indépendant(e) de sa formation.

► Quitte à remettre les pieds dans le plat, un diplôme de philo ou de français, cela n'aide pas à être à l'aise avec les ordres de grandeur (cela n'interdit pas de l'être, mais n'offre aucune garantie). Or le Diable, dans cette affaire, se cache dans les chiffres : si on peut remplacer tout le pétrole et tout le nucléaire avec 3 éoliennes, c'est bien évident que [la conclusion n'est pas la même que s'il en faut plusieurs millions pour parvenir au même résultat.](#)

► Dans le même ordre d'idées, quand un(e) journaliste n'a pas de formation technique préalable sur un sujet donné, et donc qu'il ne sait pas "où est la vérité" (sur le plan technique s'entend), son inclinaison naturelle sera de faire comme un juge : il interrogera chaque camp en présence, et sera fort tenté de faire un papier présentant chaque opinion comme une possibilité réelle, alors que si cela se trouve l'une des deux opinions est incompatible avec le monde tel qu'il existe.

Un autre effet induit de cette manière de procéder est que, si la même place est laissée à chaque point de vue, le lecteur pensera, "vu de l'extérieur", que les deux camps en présence sont numériquement équivalents, et qu'ils sont également qualifiés pour se prononcer sur la question, alors que cela ne peut très bien ne pas être le cas "vu de l'intérieur" (et de fait c'est exactement ce qui se passe pour le changement climatique).

Peut-on dire que notre journaliste est "indépendant(e)" s'il met involontairement en avant des thèses improbables, ou présente involontairement comme légitimes des gens qui ne le sont pas, ou vaudrait-il mieux dire qu'il était parfaitement dépendant de son absence de connaissances préalables ?

➤ un(e) journaliste n'est pas indépendant(e) de ses opinions. Ces opinions n'ont pas plus de raisons d'avoir été forgées sur la base d'une information objective que les opinions de n'importe qui d'autre : avant d'être journaliste, notre ami(e) s'informait comme son futur public : en lisant le journal ! Et même pendant l'exercice de leur métier, une large fraction des journalistes continue à s'informer en lisant le journal.....

L'existence d'opinions personnelles du journaliste influence nécessairement l'inévitable tri dans les informations connues, la sélection des individus à qui l'on donne la parole, ou encore la pagination qui sera modulée en fonction de sa propre hiérarchie, pour privilégier - plus ou moins consciemment - son point de vue. Le nucléaire offre un merveilleux terrain pour observer ce

genre de comportement : 20 morts dans une explosion de raffinerie en Algérie ou un coup de grisou en Chine feront une brève dans un coin de page, alors qu'un accident de centrale nucléaire sans même un blessé (Three Miles Island) occupera des dizaines de pages et mobilisera les esprits pendant des mois ou des années. De même, tout le monde est au courant que l'Allemagne a décidé - par un simple vote au parlement - de "sortir du nucléaire", mais qui est au courant que les Suisses, par référendum populaire (ce qui est nettement plus démocratique !), ont décidé en mai 2003 de conserver leurs centrales nucléaires, et de se réserver la possibilité d'en construire d'autres ? Quelle autre raison donner à cette différence de traitement que "ce qu'en pensent" les journalistes qui couvrent ce sujet ?

➤ un(e) journaliste n'est pas non plus indépendant(e) de l'opinion de son patron (chef de service, par exemple). Là encore le nucléaire civil me servira d'exemple : j'ai reçu 3 témoignages de journalistes - de 3 médias différents, et pas des moindres - me disant qu'il ne leur était pas possible d'évoquer les avantages du nucléaire civil dans leur support, alors qu'ils auraient souhaité en parler, parce que la direction de la rédaction était contre (qu'ils se rassurent, j'emporterai le secret dans la tombe). Bien évidemment je ne peux donner des exemples que dans les domaines que je connais, mais je ne vois pas de raison évidente de penser qu'il en va différemment pour les autres sujets un peu techniques que je suis de moins près.

Est-ce très gênant de savoir que, de fait, un(e) journaliste n'est pas plus indépendant(e) que quiconque ce soit d'autre, quoi qu'il (elle) en dise (ou plus exactement quoi que les directeurs de journaux en disent) ? A mon sens, non : il suffit de le savoir (et puis, de toute façon, cela n'aurait pas de sens de vouloir qu'un(e) journaliste n'ait ni patron, ni opinions, ni banquier, ni formation).

La bonne question, cependant, est : pourquoi la profession journalistique revendique-t-elle périodiquement une indépendance qui ne veut rien dire ? Plutôt que de proclamer une indépendance qui n'existe nulle part, pas plus dans un journal que chez moi ou ailleurs, il vaudrait bien mieux jouer la transparence, c'est-à-dire exposer clairement quelles opinions on défend et pourquoi, et de qui on dépend financièrement (parce que personne ne vit d'amour et d'eau fraîche). Après, le lecteur se fera sa propre opinion !

Quel recours a-t-on quand il y a "une bêtise" dans le journal ?

Imaginons que je lise, dans un journal, une information qui est contraire aux données scientifiques connues (par exemple que le changement climatique n'est étudié par la science que depuis 20 ans, alors qu'il s'est [publié des choses bien avant](#)) voire une conclusion parfaitement fantaisiste, en ce sens qu'elle est contraire aux lois de la physique et incompatible avec les ordres de grandeur connus (par exemple qu'il [suffit de planter quelques arbres pour compenser les émissions humaines de gaz carbonique](#)). Quelle possibilité a-t-on de faire en sorte que la "bonne" information soit publiée ? Eh bien, au risque de me faire encore plus d'ennemis, aucune. **Il n'y a aucune garantie de recours contre une fausse information si elle ne tombe pas dans quelques cas de figure bien précis, tels la diffamation ou l'injure.**

Si un journaliste dit "Jancovici est un abruti", ou "Jancovici est un gros menteur", j'ai un moyen de recours légal : j'attaque en diffamation si j'estime que cela est utile (en l'occurrence j'en doute !) et éventuellement il y aura un rectificatif dans le journal. Mais si un journaliste publie un article dans lequel il explique que la communauté scientifique dans son ensemble est incompétente, menteuse, et vendue à un complot onusien (ce que j'ai trouvé dans un [article du Point que j'ai commenté](#)), ou plus généralement si le journaliste ne vise pas un individu en particulier, mais une vérité scientifique en général, **il n'y a aucun recours possible** pour l'empêcher de le faire :

- Comme il n'y a pas de personne ou de laboratoire nommément désigné, l'attaque en diffamation n'est pas recevable,
- Bien sûr, les lecteurs peuvent protester, mais comme c'est le journal lui-même qui décidera souverainement et sans appel possible s'il publie ou non la lettre, il n'y a aucune garantie de voir la bonne information portée à la connaissance des lecteurs ensuite (si je prends mon propre cas, sur lequel j'ai incontestablement des données de première main, depuis 2000 j'ai envoyé plus d'une centaine de lettres à divers media, généralement pour réagir à la publication d'informations erronées, ou tellement "résumées" qu'elles amenaient à une conclusion erronée, et seules quatre ont fait l'objet d'une publication, toujours partielle),
- Si le media est une télévision ou une radio, **il n'y a même pas d'endroit prévu pour rectifier les bêtises diffusées** : il n'y a ni courrier des lecteurs, ni créneau horaire réservé pour diffuser un éventuel rectificatif, et chacun aura pu constater que les journaux radio ou télé ne comportent jamais la mention d'une erreur dans une édition précédente (alors qu'il y en a, bien évidemment). Je ne parle même pas de l'absence de rectification des bêtises contenues dans les documentaires ou reportages : si un documentaire télé dit des bêtises, le cas de figure standard est que ces dernières ne seront jamais corrigées par la suite. En

bref, l'audiovisuel ne dispose d'aucune procédure permettant de corriger les erreurs contenues dans les informations diffusées, sauf rarissime exception. Ce media serait donc infallible ?

➤A la différence d'un certain nombre de professions (médecins, avocats, comptables par exemple), la profession journalistique n'est dotée d'aucun code de déontologie, et d'aucun conseil de l'ordre ou équivalent. Un futur journaliste ne prête pas serment, en s'engageant à respecter un certain nombre de principes élémentaires, comme par exemple systématiquement faire relire ses interviews à l'interviewé avant publication, ou encore systématiquement vérifier les informations factuelles contenues dans les déclarations des personnes interviewées, ou encore toujours s'abstenir de faire une généralité d'un cas particulier sans preuve (et ca, ils aiment !), etc. Un journaliste peut donc mentir de façon éhontée toute sa vie durant sans rien risquer comme sanctions de quiconque, dès lors qu'il se garde de citer des individus ou des entités précis, et qu'il le fait en accord avec la rédaction de son journal. J'ai 2 exemples concrets où j'ai su (cela a été explicitement dit à un de mes amis, ou à moi-même) qu'un journal avait délibérément propagé de fausses informations sur le changement climatique, considérant que cela serait plus apprécié des lecteurs que de se contenter de dire la vérité, au motif que cette dernière est "banale".

Quelle conclusion tirer de tout cela ?

Tout d'abord il y a une conclusion à ne pas tirer, malgré tout ce qui précède, qui serait de dire "tous pourris", et de penser que les medias mentent volontairement, partout et tout le temps. Il existe plus de 500 titres rien que pour la presse écrite d'information générale, et il est assez vraisemblable que la répartition des comportements chez les journalistes ressemble à ce qu'elle est ailleurs : il y a quelques % de gens remarquables (et remarqués), quelques % de très sales cons (et qui sont aussi très remarqués !), et 96% de personnes qui font ce qu'elles peuvent, du mieux qu'elles le peuvent, dans le cadre contraint qui est le leur.

L'essentiel des conclusions erronées que j'ai pu lire - mais je ne suis pas une revue de presse à moi tout seul ! - relève d'une connaissance incomplète des sujets évoqués, d'un défaut d'appréhension des ordres de grandeur, ou du manichéisme forcé par manque de place, et non de la malhonnêteté délibérée. Il n'en reste pas moins que, "vu de l'extérieur", c'est-à-dire sans connaissance personnelle préalable du sujet concerné, il n'y a aucun moyen de savoir qui travaille bien et qui travaille moins bien dans le contexte actuel, aucun moyen de savoir si la vérité, c'est-à-dire ce qui découle de l'examen des faits, est correctement

restituée dans les media, et aucun moyen de savoir si les points évoqués sont ceux que l'on aurait considérés comme essentiels "à la place du journaliste". Une autre conclusion doit donc être tirée de ce qui précède : il ne faut jamais prendre ce qui figure dans les media pour argent comptant. Le support n'est pas une garantie : j'ai déjà vu traîner des énormités dans Le Monde, ou [sur Arte](#).

Incidemment, une conclusion majeure qu'il faut en tirer, c'est que la classe politique, qui s'informe pour l'essentiel en lisant le journal, en écoutant la radio et en regardant la télé, est très largement ignorante de ce qui n'y figure pas (dans le journal). Les questions d'énergie et de changement climatique, dont la présence dans la presse, hors actualité immédiate, et hors magazines "spécialisés" (magazines professionnels ou grand public type Science et Vie), est rarissime, et toujours excessivement résumée par manque de place, sont donc des sujets pour lesquels l'ignorance est très largement partagée chez ceux qui nous gouvernent, et cela est valable à tous les niveaux. Je ne sais s'il faut le déplorer, mais c'est un fait.

Pour en revenir au citoyen de base et au changement climatique, il est néanmoins possible de vérifier ou compléter ce qu'il y a dans le journal, pour autant que l'on ait le temps : les informations ne sont pas confidentielles, et la source souvent aisément accessible. Une information a généralement été publiée par "quelqu'un d'autre" avant d'être reprise dans le journal : elle peut bien sûr être contenue dans un article de la littérature scientifique, mais elle peut aussi figurer, de manière plus accessible, sur un site Internet, tel celui du [GIEC](#), ou de l'[organisation météorologique mondiale](#), ou de [Météo France](#), ou d'une fédération d'assureurs, ou de la [NASA](#), ou de la [NOAA](#), ou de l'[IFREMER](#).....

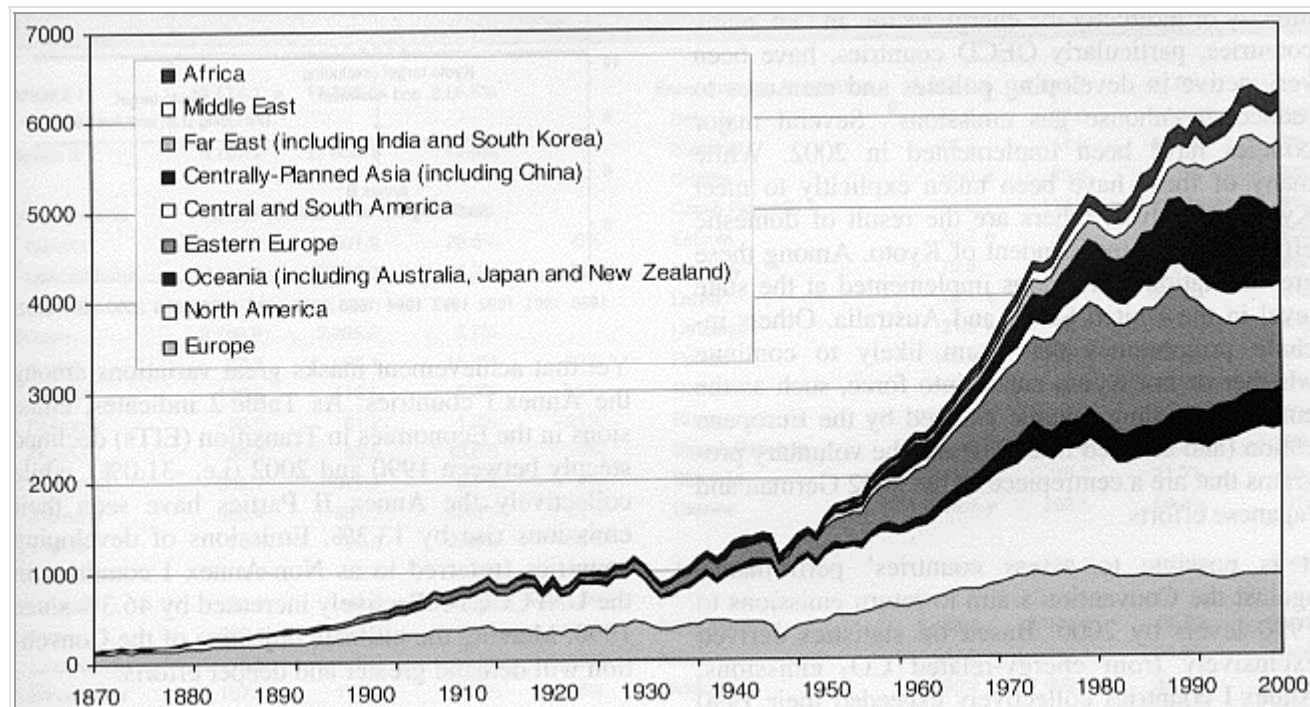
Bref, armé d'un moteur de recherche et d'un peu de patience, il ne sera pas rare de retrouver la trace de l'information originelle. Et rien n'empêchera alors le lecteur de se faire sa propre opinion, un peu plus éclairée !

Comment évoluent actuellement les émissions de gaz à effet de serre ?

dernière version : septembre 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Depuis que Denis Papin et James Watt nous ont fait découvrir les joies de la machine à vapeur, la croissance de la production industrielle - qui, en volume, augmente sans discontinuer depuis cette époque, la "dématérialisation" n'étant qu'un terme à la mode - les émissions de CO₂ - le principal [gaz à effet de serre d'origine humaine](#) - augmentent, et non seulement elles augmentent, mais elles ont même tendance à augmenter de plus en plus vite, comme on peut facilement le constater ci-dessous.



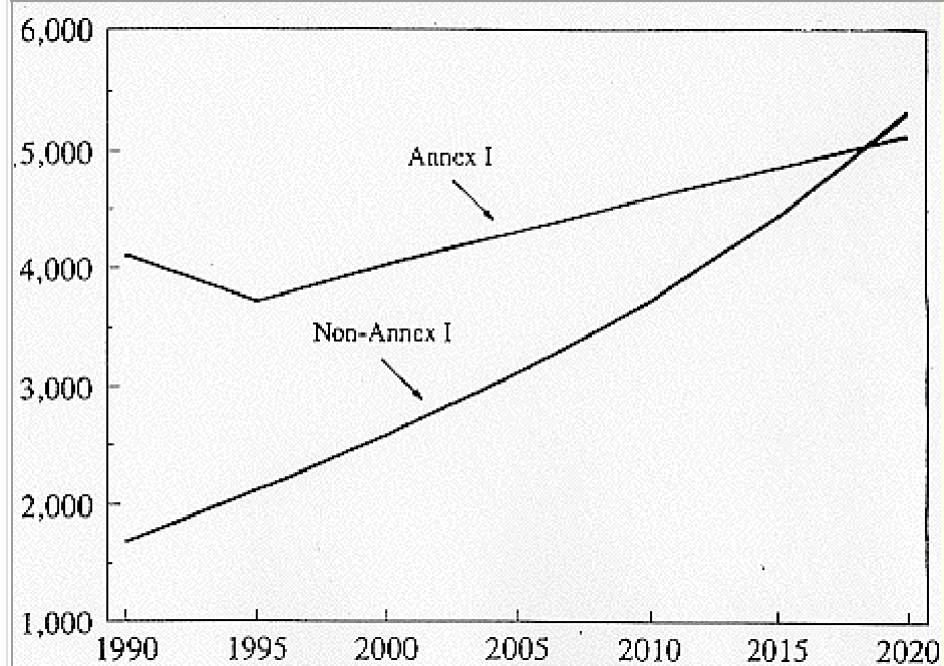
Evolution constatée des émissions mondiales du seul CO₂ provenant des combustibles fossiles, en millions de tonnes de carbone. Le lien entre développement industriel et émissions de CO₂ est manifeste, et fonctionne dans les deux sens : la récession qui a frappé les pays de l'Est après la chute du Mur de Berlin a engendré une baisse massive de leurs émissions (Eastern Europe sur le graphique).

Source : Marland, G., T.A. Boden, and R. J. Andres, 2003. Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., United States

Incidemment il y a une observation intéressante à faire à partir du graphique ci-dessus : les seules occasions de diminution des émissions de CO₂ nous ont été fournies par des événements peu agréables (guerres, récessions...). Une conclusion élémentaire de cette remarque est que, dans un monde fini, avec des émissions qui ne peuvent donc pas croître indéfiniment, si nous ne mettons pas en oeuvre un programme volontaire de décroissance des émissions, c'est la finitude du monde qui s'en chargera à notre place, à travers une ou plusieurs catastrophe(s).

Le lien entre degré "d'avancement" industriel et niveau des émissions est malheureusement très fort ; ainsi, si l'on répartit les émissions mondiales de CO₂ entre les pays "développés", qui sont aussi ceux qui ont pris un engagement de réduction au titre du protocole de Kyoto (dans le [langage du protocole](#) la liste de ces pays s'appelle l'annexe 1), et pays en développement, qui n'en ont pas, il est facile de constater que :

- l'essentiel des émissions mondiales en 1990 vient des pays industrialisés (qui ne représentent pourtant que 1 milliard d'être humains)
- les pays en cours d'industrialisation ont cependant des émissions en hausse plus rapide (et ils ont aussi une croissance économique plus forte), avec pour conséquence que, tendanciellement, les pays "en développement" rattraperont les pays "développés" en 2020.

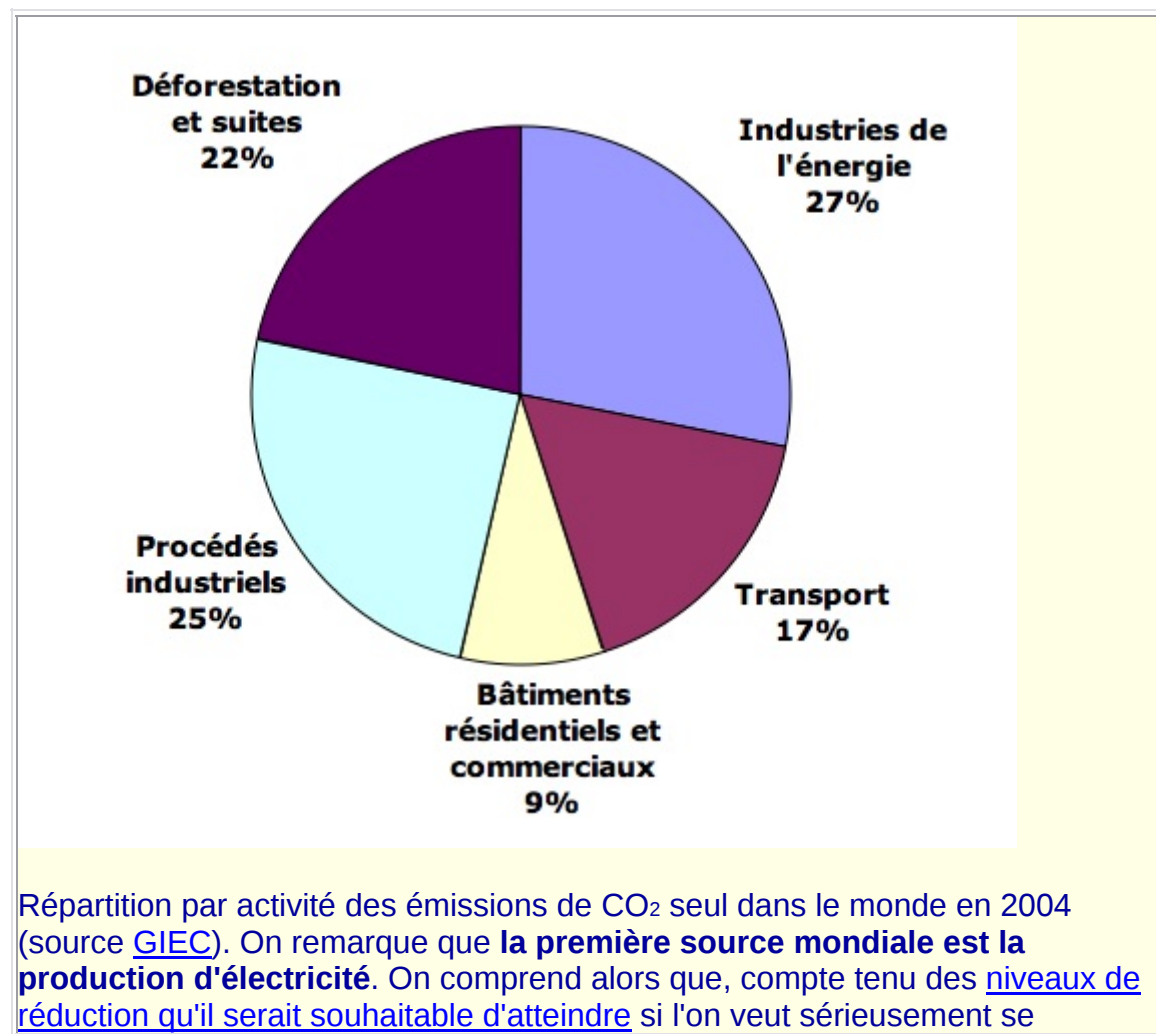


Emissions de CO₂ seul dans le monde, en millions de tonnes d'équivalent carbone.
Source : [Mission Interministérielle de l'Effet de serre](#)

Annex I désigne l'ensemble des pays qui ont pris un engagement de réduction dans le cadre du protocole de Kyoto ; il s'agit des pays développés ou "en transition" (pays de l'Europe de l'Est, essentiellement).

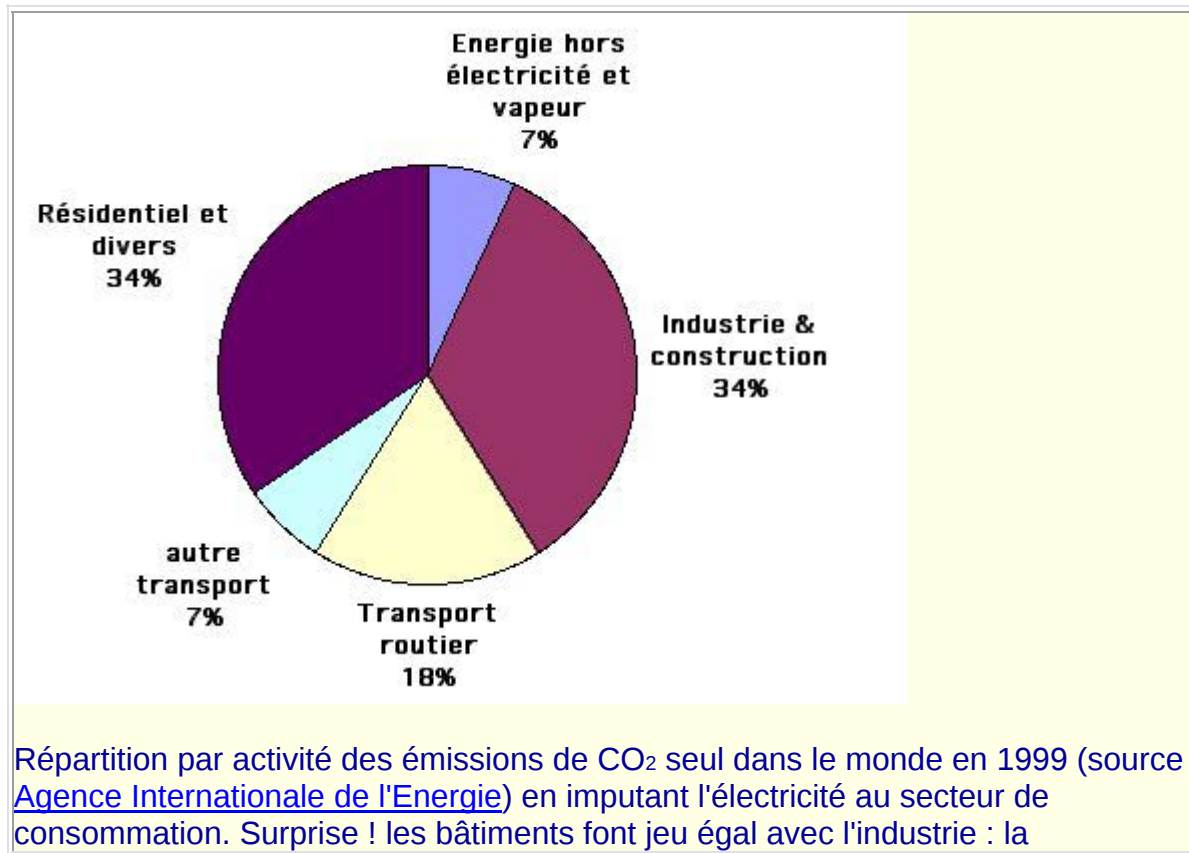
Annex II désigne les pays signataires du protocole de Kyoto mais qui n'ont pas pris d'engagement de réduction (essentiellement les pays du tiers monde, dont la Chine, premier consommateur mondial de charbon).

L'examen des sources de CO₂ fossile explique facilement cette situation : en effet, ce gaz est émis là où nous brûlons du charbon, du gaz et du pétrole, et cela signifie souvent une application "industrielle", ou du moins de la "civilisation industrielle", car une voiture ou un chauffage central au gaz en font assurément partie.



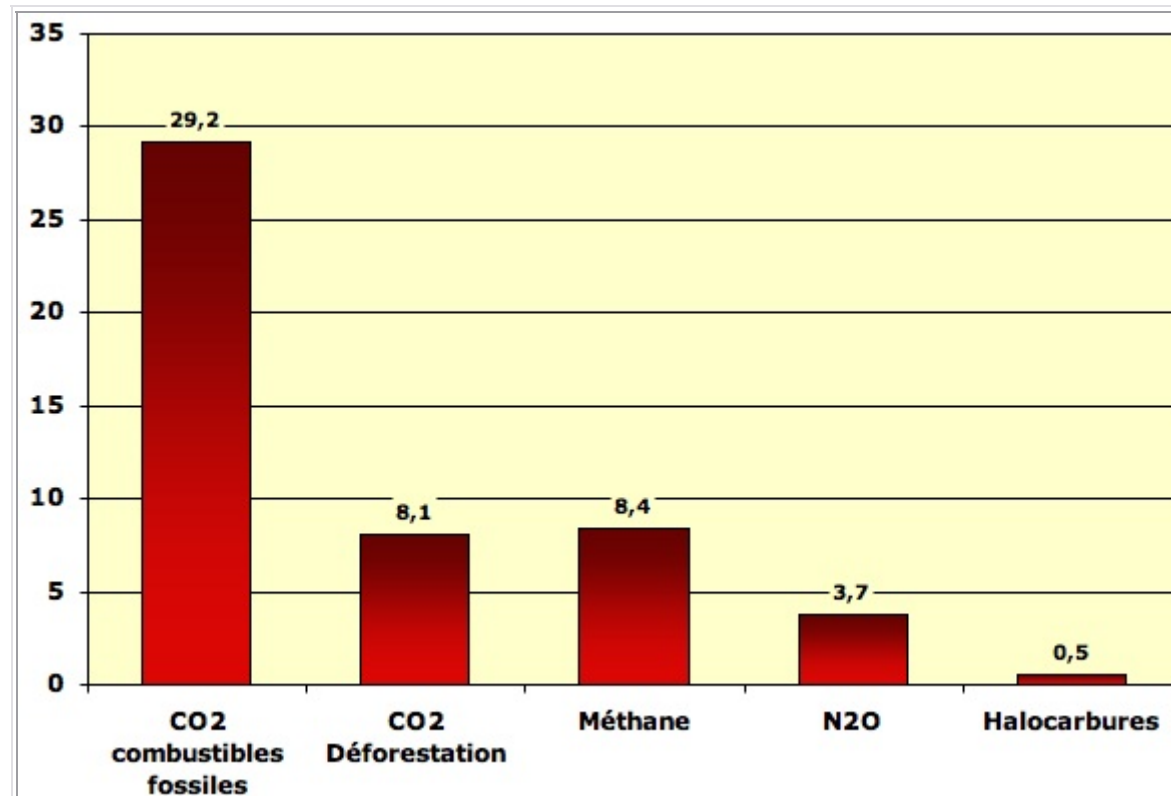
préoccuper du phénomène, que le combat contre l'effet de serre sera plus facilement gagné si l'on ne refuse pas le recours au nucléaire.

En regardant le graphique ci-dessus, nous pouvons être tentés de penser que l'essentiel du problème vient "des entreprises" : après tout, ce sont elles qui produisent l'électricité, possèdent les raffineries, opèrent les industries, et une partie des moyens de transport. Mais une autre lecture - intéressante, assurément ! - peut être proposée si l'électricité est imputée au secteur qui la consomme.



consommation d'énergie dans les bâtiments - et en particulier dans les logements - est donc un enjeu majeur pour la lutte contre le changement climatique.

Mais le CO₂ d'origine fossile ne représente pas l'intégralité du problème : une partie de l'effet de serre d'origine humaine vient d'[autres gaz](#), dont la contribution n'est pas totalement marginale.



Emissions mondiales pour les divers gaz à effet de serre en 2000 (excepté l'ozone), en milliards de tonnes [équivalent CO₂](#). Les gaz hors CO₂ lié à l'usage de l'énergie représentent environ 40% du problème. Source : [GIEC](#), 2007

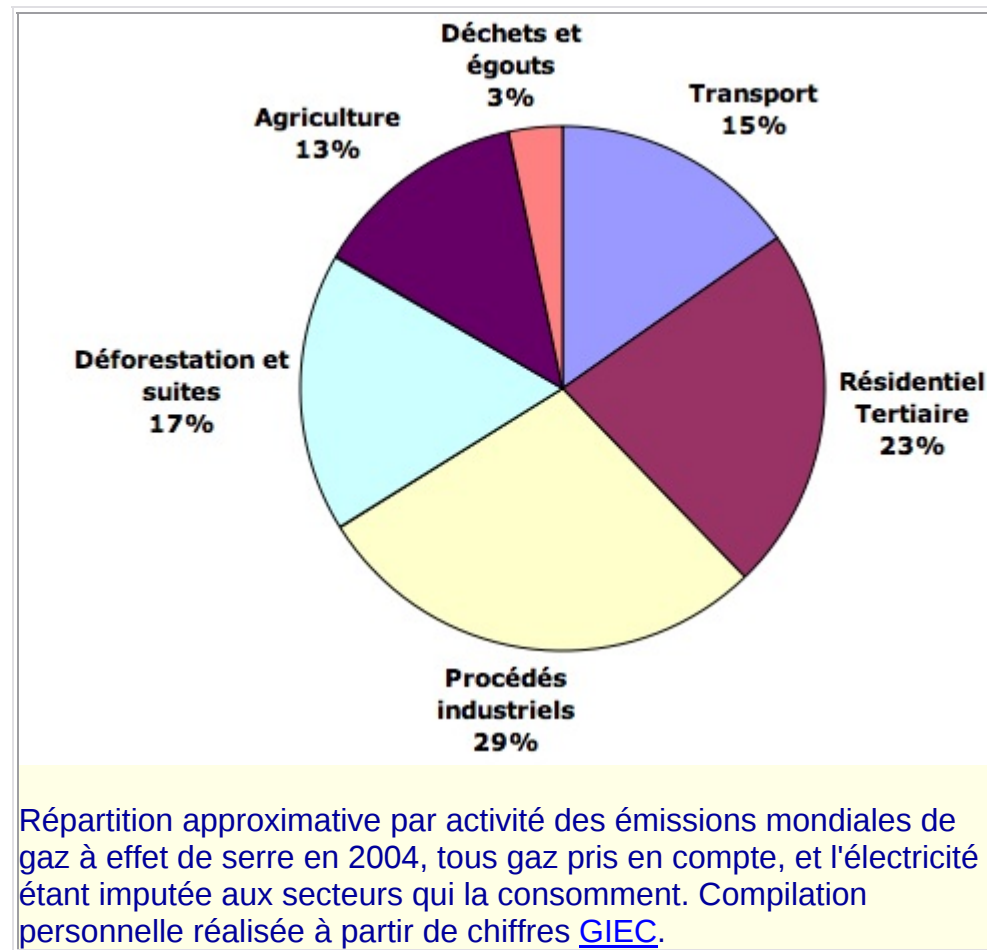
Les émissions des [autres gaz](#) concernent

➤ le CO₂ lié à la déforestation, souvent rangé dans la catégorie "changement d'utilisation des sols", parce que en pratique le changement d'utilisation des sols qui engendre des émissions de CO₂ significatives est la déforestation : la plupart du bois coupé est brûlé (l'exploitation forestière ne représente qu'une petite partie du bois coupé, même si les forestiers créent des chemins qui sont ensuite utilisés par les paysans locaux qui défrichent le reste), ce qui conduit à des émissions de CO₂, puis le sol libère du CO₂ additionnel lorsqu'il est labouré (le labourage expose l'humus à l'air, ce qui conduit à une oxydation accélérée du carbone du sol),

➤ Du méthane et du protoxyde d'azote, qui sont très liés à la production agricole (en croissance, à cause de la croissance démographique d'une part, et de l'[augmentation de la part animale](#) dans les rations alimentaires d'autre part, ce qui nécessite plus de surfaces agricoles).

➤ Des halocarbures, dont l'usage est très lié à la chaîne du froid (en croissance) ou à l'industrie des semi-conducteurs (en croissance aussi).

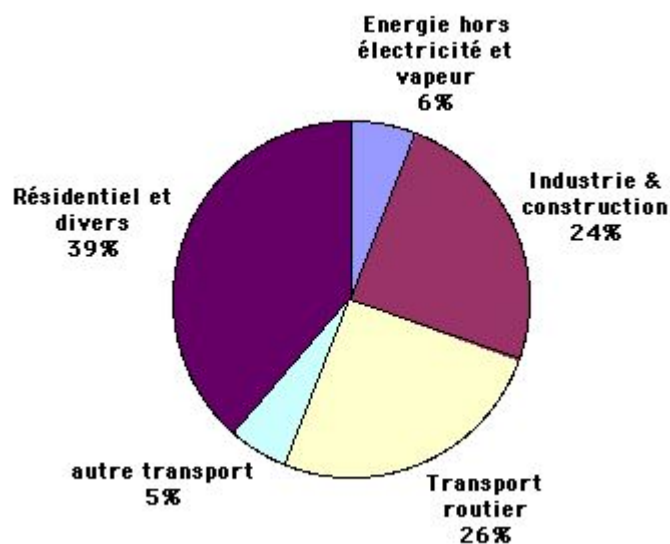
Si nous jouons maintenant au petit jeu qui consiste à affecter à chaque usage les émissions qui le concernent, alors la situation, au plan mondial, se présente à peu près comme suit



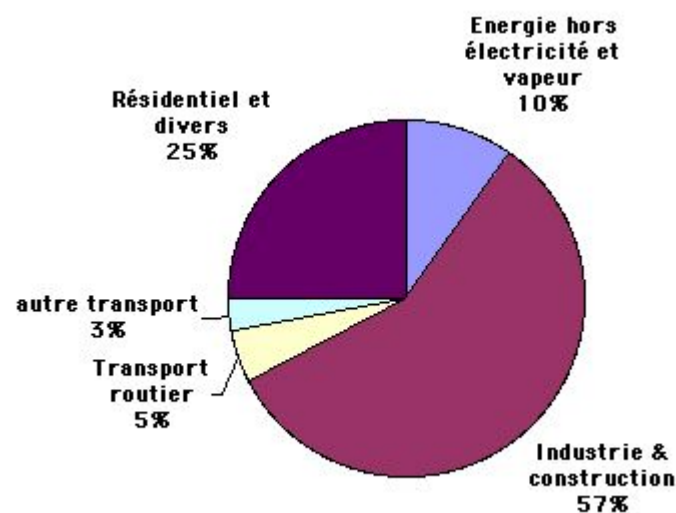
Ce dernier camembert indique clairement que la responsabilité est très diluée, et surtout que l'alimentation et les bâtiments sont des contributeurs égaux, voire supérieurs, à l'industrie et aux transports. Rien n'est simple !

Tous les pays sont-ils égaux ?

Le niveau des émissions de gaz à effet de serre et la répartition par activité de ces émissions est bien sûr très variable d'un pays à l'autre, selon la richesse globale, le mode de production d'électricité, le régime alimentaire, et le stade de l'industrialisation....

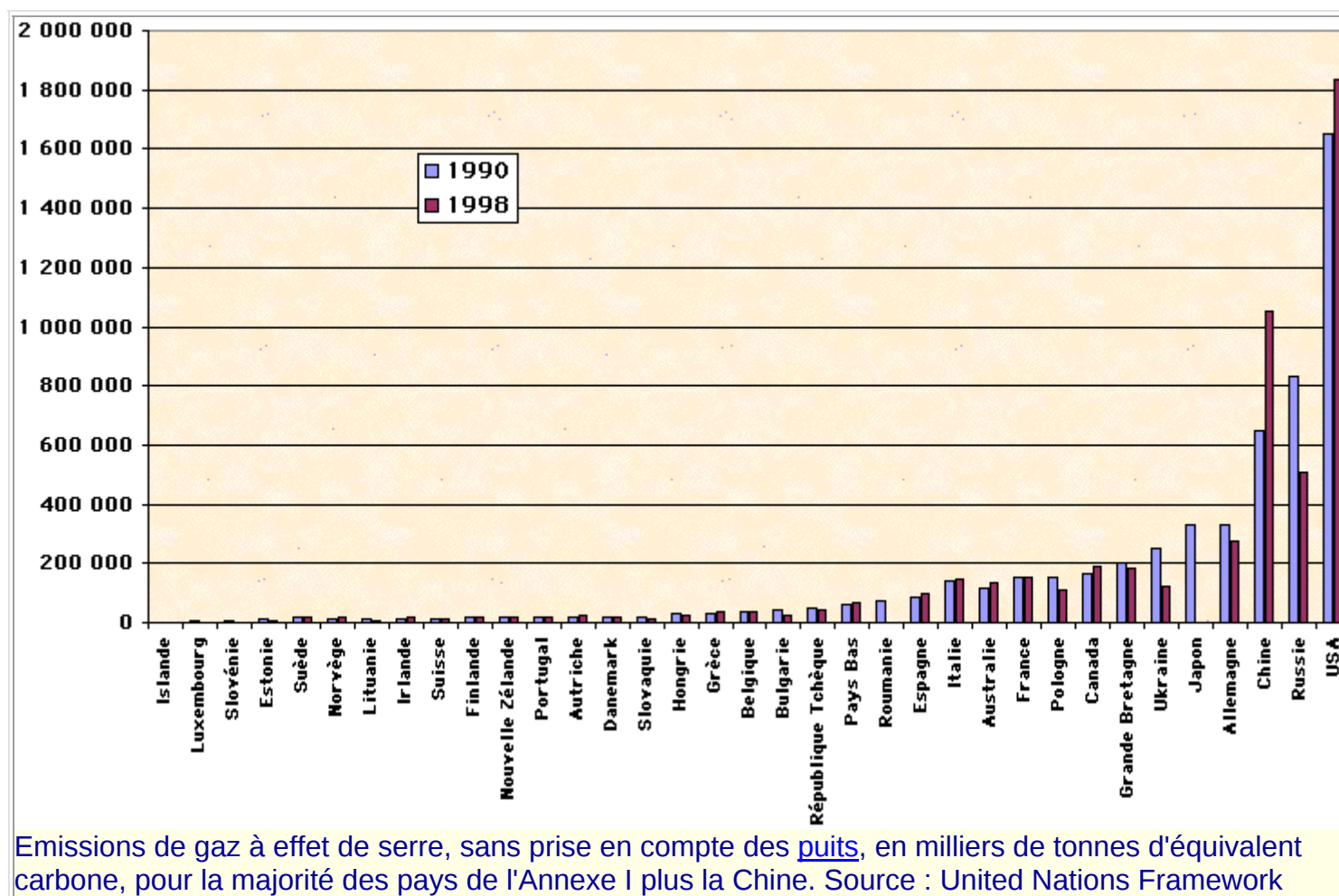


Répartition par activité des émissions de CO₂ seul pour un pays développé : les USA (l'électricité est imputée aux secteurs qui la consomment). Le bâtiment est la première source dans le monde (avec l'électricité qui lui correspond, faite pour l'essentiel, dans le monde, avec des combustibles fossiles). Source : CO₂ emissions by fuel, AIE, 2004



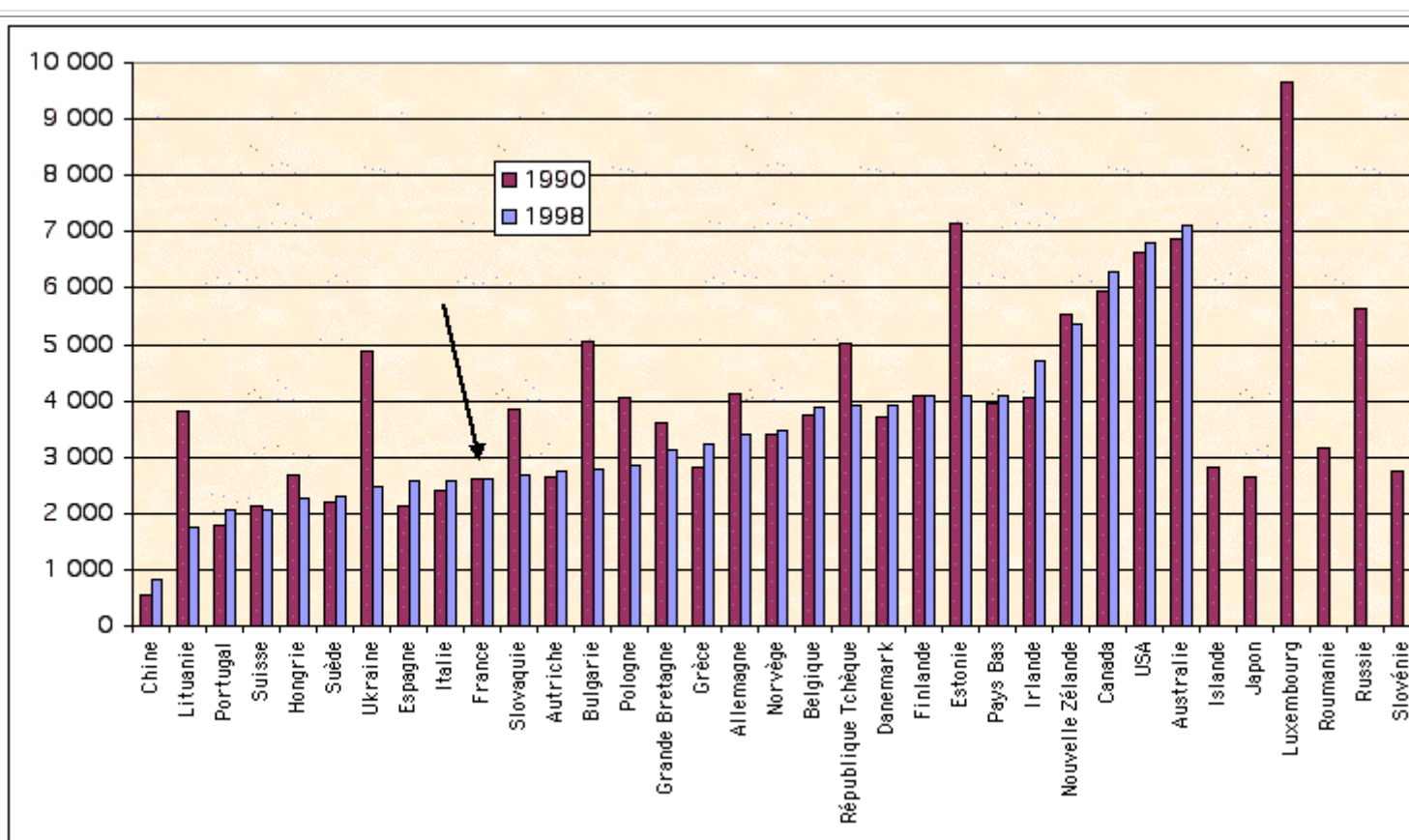
Répartition par activité des émissions de CO₂ seul pour un pays en cours d'industrialisation : la Chine (l'électricité est imputée aux secteurs qui la consomment). On note la part prépondérante de l'industrie et la part très mineure des transports. Source : CO₂ emissions by fuel, AIE, 2004

Nous pouvons ensuite disposer d'émissions par pays, et si les pays à population importante ont des émissions par tête bien inférieures à ce qu'elles sont pour les pays industrialisés, ils fournissent néanmoins une large partie des émissions mondiales à cause de leur démographie.



Convention on Climate Change - [UNFCCC](#) (pour la Chine, pour laquelle on indique uniquement les émissions de CO₂ ; source : Ministère de l'[Industrie](#))
On remarque que les pays de l'Est ont tous baissé leurs émissions de manière importante, essentiellement à cause...de la récession intervenue dans ces pays. Croissance économique et lutte contre le changement climatique [sont-ils compatibles](#) ?

Cependant les émissions par habitant suivent une hiérarchie fort différente, et s'il est un fait qui ne surprendra personne, à savoir que émissions et développement économique vont plus ou moins de pair, ce classement révèle une surprise : **au sein des pays du G7, les émissions par tête varient d'un facteur 3 entre les pays les plus "vertueux" et ceux qui le sont moins.**



Emissions de gaz à effet de serre par habitant et par an, selon les pays, en kg d'équivalent carbone (Chine : émissions de CO₂ seul), pour 1990 et 1998 (classées par ordre d'importance en 1998).

On remarque que parmi les pays disposant d'un fort PNB par habitant, les plus "vertueux", outre la France, sont la Suède et la Suisse, qui produisent aussi - comme la France - leur électricité avec essentiellement du nucléaire et de l'hydraulique. Dans le cas de la Suisse se rajoute le fait que son économie est fortement tertiaisée. On remarque aussi que les émissions par habitant en Chine sont

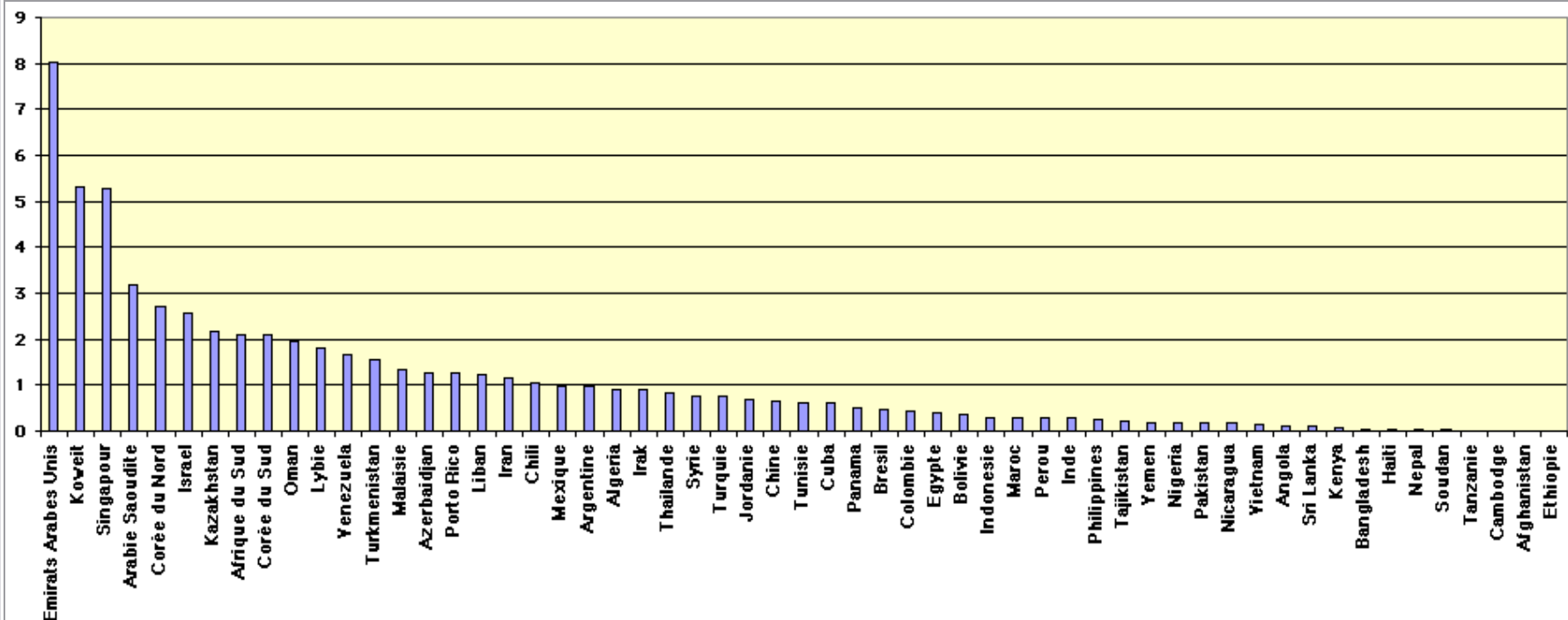
quasiment 10 fois plus faibles que celles des USA.

Ce graphique montre à nouveau la forte diminution intervenue dans les anciens pays communistes.

Source : United Nations Framework Convention on Climate Change (sauf la Chine : Ministère de l'Industrie) - [UNFCCC pour les émissions](#), et Institut National d'Etudes Démographiques - [INED](#) pour les populations ; les divisions ont été faites par votre serviteur.

Les "grands affreux" pour le changement climatique sont incontestablement les Américains : non seulement leur pays est le premier émetteur au monde, mais ils sont aussi sur le podium pour les émissions par habitant, et leurs émissions sont en croissance !

Les pays "sous-développés" sont nettement moins émetteurs : en moyenne, l'émission de CO₂ fossile par habitant est de l'ordre de 0,4 tonne d'[équivalent carbone](#) par an (soit un cinquième d'un Français, et 7% de ce que "fait" un Américain), mais tous les pays hors Annexe I (ceux qui n'ont pas pris d'engagements de réduction) ne sont pas si bas !



Émissions de CO₂ seul par habitant pour une large sélection de pays de l'Annexe 2 (pays n'ayant pas pris d'engagement de réduction à Kyoto), en tonnes équivalent carbone, avec puits. Pour ce seul gaz, la Suisse serait à 1,7 tec/pers./an et les USA à plus de 5.

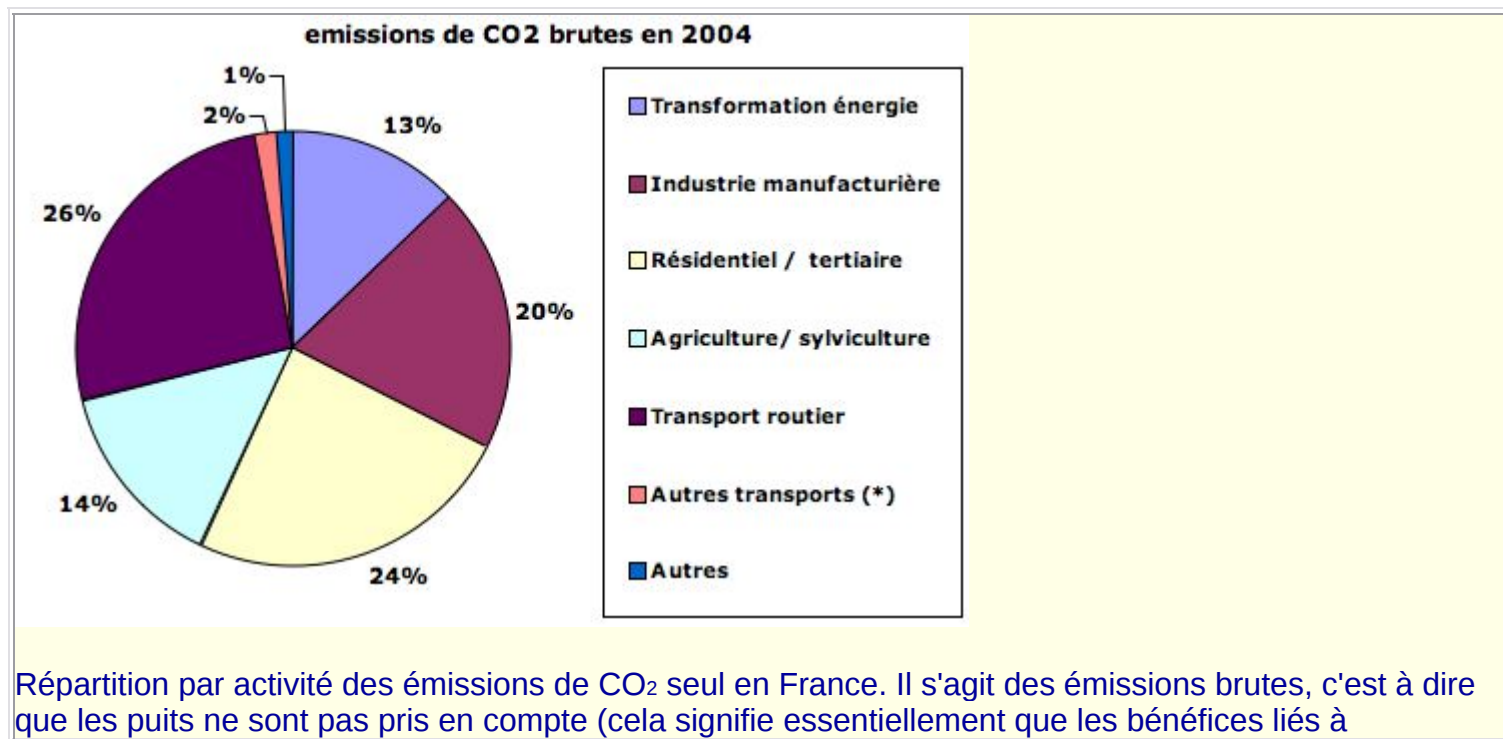
On note les émissions modestes de l'Inde (0,3 tec/pers./an en gros) et les émissions très basses des pays de l'Afrique Noire (le Nigeria est le pays le plus peuplé d'Afrique, avec plus de 120 millions d'habitants).

On note aussi que Israël, Singapour, La Corée du Sud, l'Afrique du Sud, sans parler des pays producteurs de pétrole, qui ont tous des émissions par tête et/ou un niveau de développement voisin de celui des pays de l'OCDE, n'ont pas pris d'engagement de réduction.

Source : United Nations Framework Convention on Climate Change - [UNFCCC](http://unfccc.org).

Et en France ?

A cause du fait que nous produisons notre électricité essentiellement avec des procédés qui n'émettent pas de CO₂ (nucléaire pour 80%, et hydraulique pour 15%) la répartition chez nous n'est pas la même : pour le seul CO₂ ce sont les transports qui arrivent en tête (figure ci-dessous), suivis du poste "résidentiel - tertiaire", qui correspond à l'utilisation d'énergie fossile dans les maisons et bâtiments (chauffage pour l'essentiel, puis eau chaude pour la plus grosse partie du reste ; la climatisation à l'électricité n'est pas prise en compte car la consommation d'électricité ne produit pas de CO₂, c'est la production d'électricité [qui en produit éventuellement](#)).



l'exploitation forestière, qui conduit à de la séquestration de carbone dans les arbres transformés en produits durables, ne sont pas imputés à l'activité agricole, qui comprend aussi la sylviculture).

On remarque que **la première source en France est représentée par les transports, avec 27%**, qui est en outre la source qui croît le plus actuellement (voir plus bas).

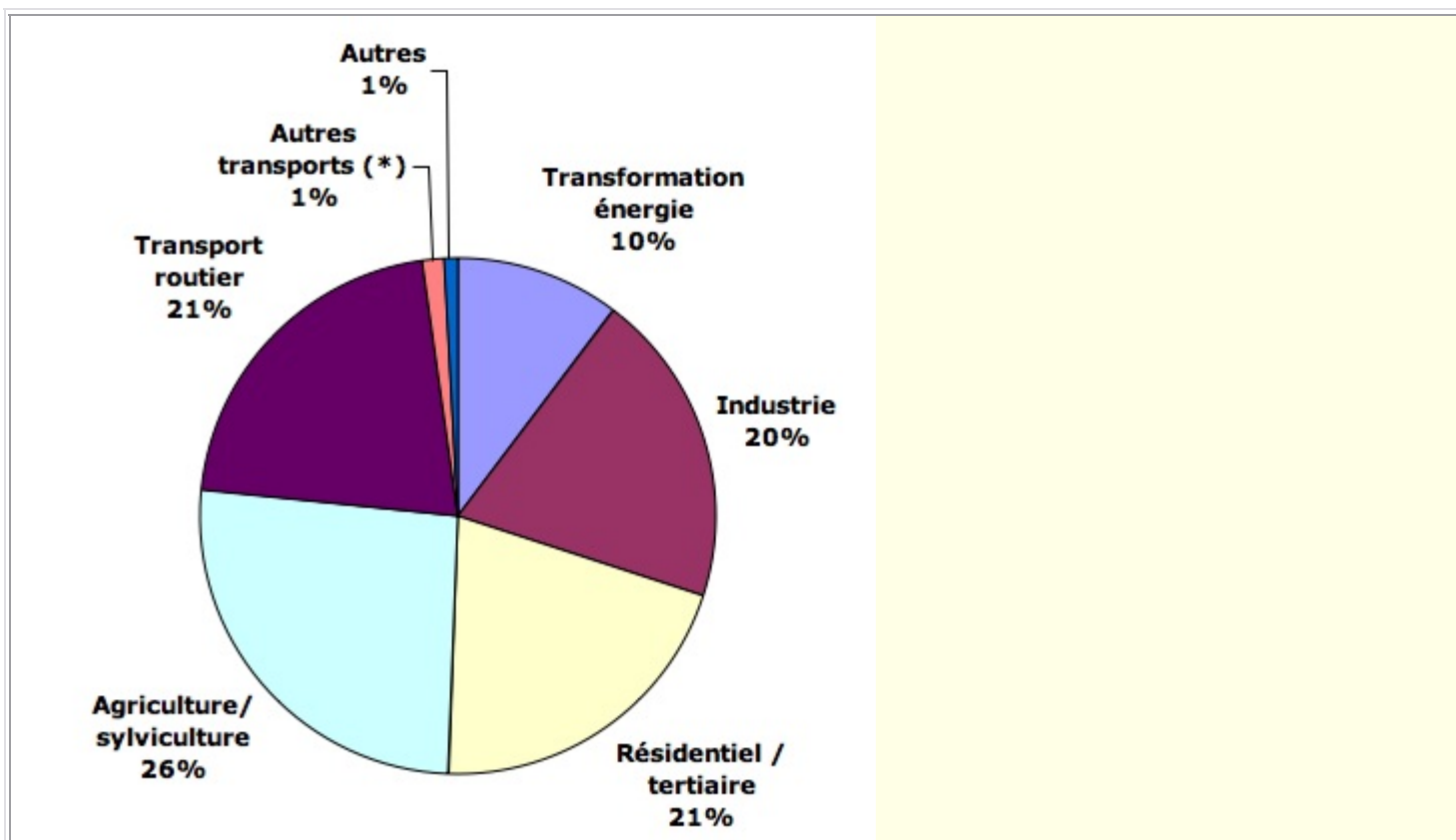
En outre, si l'on imputait aux transports les émissions des raffineries pour produire l'essence (dans le poste "transformation énergie"), celles de l'industrie pour la construction des voitures et des routes, et plus généralement toutes les émissions produites par des activités concourant aux déplacements (assurances, garages, etc) le total serait probablement plus proche de 40%. La nomenclature a son importance !

(*) le transport aérien international n'est pas pris en compte, car aux termes du protocole de Kyoto les émissions découlant du transport international aérien ou maritime ne sont pas affectées aux totaux nationaux.

Source : [CITEPA](#)

Le poste "énergie" correspond pour une grosse moitié aux centrales électriques à charbon et à gaz que nous avons aussi, et pour une petite moitié aux raffineries de pétrole (le raffinage du pétrole conduit à une auto-consommation de 8% du pétrole raffiné environ). Incidemment il est intéressant de noter que plus on cherche à avoir un carburant "propre" (exempt de soufre, etc) et plus cela engendre des émissions de CO₂ importantes pour le raffinage correspondant.

Si nous tenons maintenant compte de tous les gaz à effet de serre pris en compte dans les négociations internationales, et pas seulement du CO₂, alors la répartition change : c'est l'agriculture qui arrive en tête !



Répartition par activité des émissions en France pour l'année 2004, tous [gaz à effet de serre](#) (sauf ozone) pris en compte. Il s'agit des émissions brutes (je ne sais pas imputer les puits par activité !).

On remarque que **la première source devient alors l'activité agricole au sens large**. Toutefois la même remarque que ci-dessus s'applique : si l'on réintègre les émissions des raffineries, de l'industrie auto, etc, les transports montent probablement à plus de 25%.

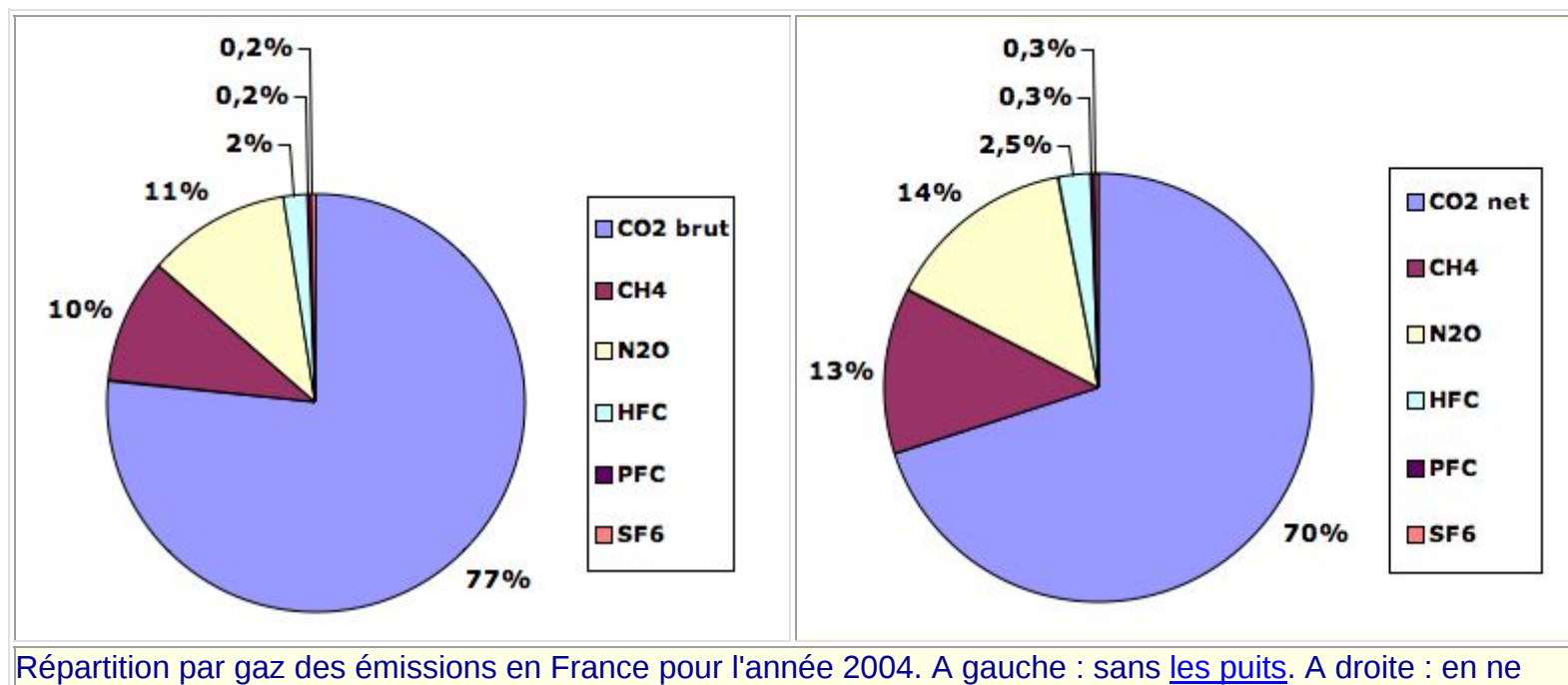
Cela étant, un raisonnement similaire peut s'appliquer à l'agriculture : si nous rassemblons dans un

même sac tout ce qui est émis pour nous fournir de la nourriture (agriculture, mais aussi le transport et la transformation industrielle de la nourriture, y compris la fabrication des emballages que nous jetterons ensuite), alors manger est à l'origine d'un tiers des émissions environ.

Source : [CITEPA](#), 2005

(*) le transport aérien international n'est pas pris en compte.

En effet, l'agriculture est à l'origine de l'essentiel des émissions des gaz "hors CO₂" : 2/3 du méthane - CH₄ - et du protoxyde d'azote - N₂O - proviennent des activités agricoles, respectivement dus à l'élevage bovin et à l'utilisation des engrais. Ces gaz "mineurs" représentent un peu plus ou un peu moins d'un quart des émissions globales selon la manière de compter (graphiques ci-dessous).



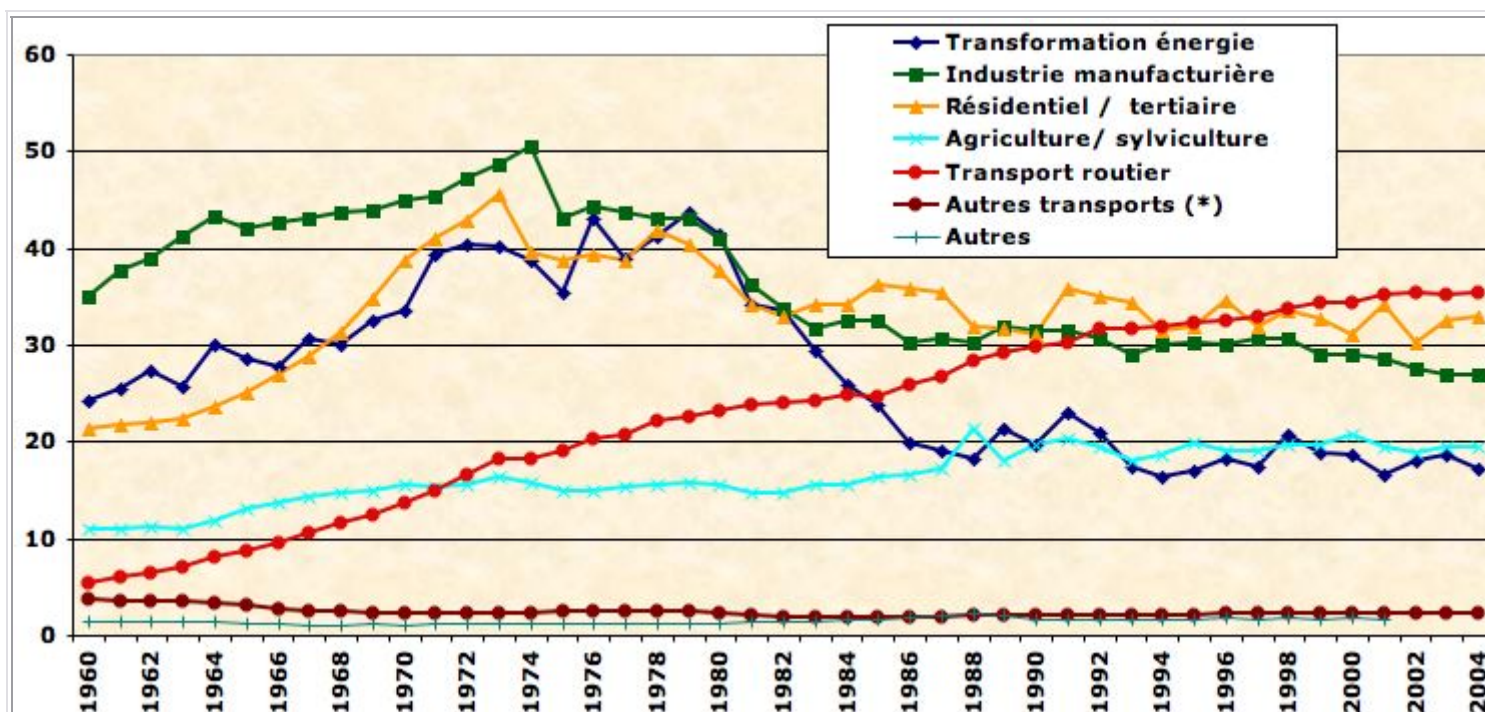
comptant que le solde pour le CO₂, une fois [les puits](#) pris en compte. HFC, PFC et SF₆ sont des gaz industriels appelés [halocarbures](#).

Source : [CITEPA](#), 2005

Les proportions respectives du CO₂, du méthane et du protoxyde d'azote sont variables selon les pays : les pays à économie agraire ont des émissions de méthane proportionnellement plus élevées, voire qui peuvent être dominantes, alors que les pays très industrialisés et qui en plus font leur électricité au charbon ont des émissions de CO₂ encore plus dominantes qu'en France.

En France, tous les postes évoluent-ils de la même manière ?

Non : les évolutions respectives sont assez variables d'un poste à un autre. Les chiffres ci-dessous ne sont bien sûr valables que pour la France, mais les évolutions décrites se retrouvent peu ou prou dans bien d'autres pays du monde développé, à l'exception de la baisse des émissions pour l'électricité, qui est une spécificité française.



Evolution par activité des émissions de CO₂ seul (en France) depuis 1960, en millions de tonnes équivalent carbone.

Trois époques se lisent clairement sur ce graphique :

- jusqu'au premier choc pétrolier, tous les postes d'émission sont en hausse. Les "Trente Glorieuses" sont allées de pair avec une très forte augmentation des émissions dont la phase finale se voit clairement de 1960 à 1973.
- après le choc pétrolier, l'industrie se met à la chasse au gaspi de manière efficace, et électrifie un certain nombre d'usages par ailleurs, et obtient une baisse continue jusqu'au "contre-choc" (en 1985 le pétrole est devenu très bon marché). Pendant la même période le lancement du programme

électronucléaire conduit à une diminution rapide - mais avec un décalage de 10 ans, le temps de construire les centrales - des émissions du secteur de l'énergie (c'est cette baisse que l'on ne retrouve pas nécessairement dans d'autres pays), et enfin les particuliers ont aussi effectué des économies chez eux (baisse du poste "résidentiel tertiaire"). Pendant cette période, toutefois, les émissions des transports continuent de croître, quoique moins vite que sur la période 1960-1974.

► depuis le contre-choc de 1985, tous les postes sont plus ou moins stables, exception faite des transports qui poursuivent sur leur lancée et de l'agriculture, qui poursuit sa mécanisation (qui consiste essentiellement à remplacer des individus par du pétrole !).

Source : [CITEPA](#), 2005

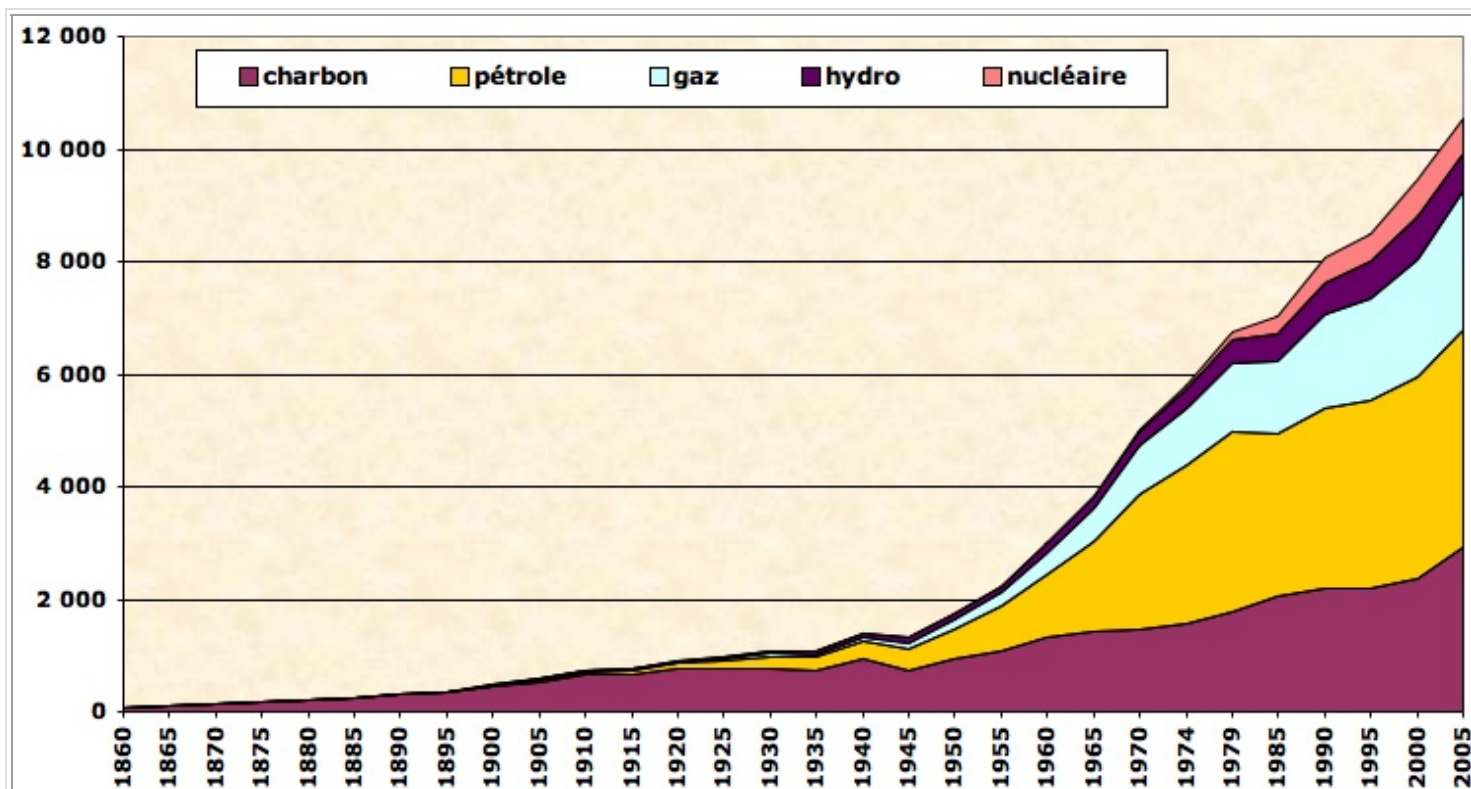
(*) le transport aérien international n'est pas pris en compte

A quoi ressemble notre consommation énergétique actuellement ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Depuis 1860, date des premières statistiques que j'ai pu trouver, la consommation énergétique mondiale n'a cessé de croître de manière plus ou moins exponentielle (ci-dessous).



Evolution constatée de la consommation totale d'énergie commerciale (c'est à dire hors bois, dont une large part échappe aux circuits commerciaux), depuis 1860, en millions de tonnes équivalent pétrole (une tonne équivalent pétrole = 11600 kWh). Nous avons là une belle exponentielle !

On constate facilement que :

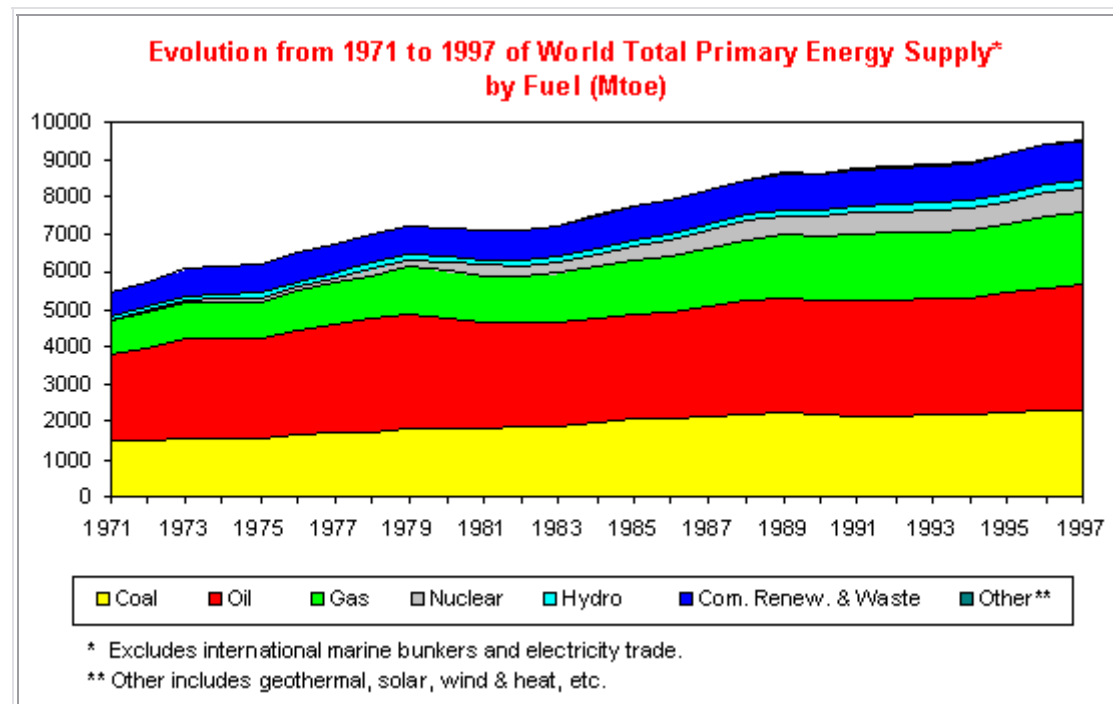
- ni la guerre de 14, ni celle de 39, ni le choc pétrolier de 1974, ni la "Guerre du Golfe" n'ont affecté significativement une hausse constante,
- nous sommes massivement dépendants des énergies fossiles (85% de l'approvisionnement mondial)

aujourd'hui),

► les diverses énergies se sont plus "surajoutées" que substituées, et en particulier le pétrole n'a pas tué le charbon, dont la consommation continue de croître, et le gaz n'a pas tué le pétrole !

Sources : Schilling & Al. 1977, [IEA](#), [Observatoire de l'Energie](#).

Un zoom sur la période récente confirme que les 2 chocs pétroliers et la Guerre du Golfe ont conduit à un léger infléchissement passager, mais rien de plus.



Répartition des sources d'énergie utilisées au niveau mondial ; évolution de 1971 à 1997. La répartition différente entre nucléaire et hydroélectricité (par rapport au premier graphique de la page) tient à une différence dans les coefficients de conversion.

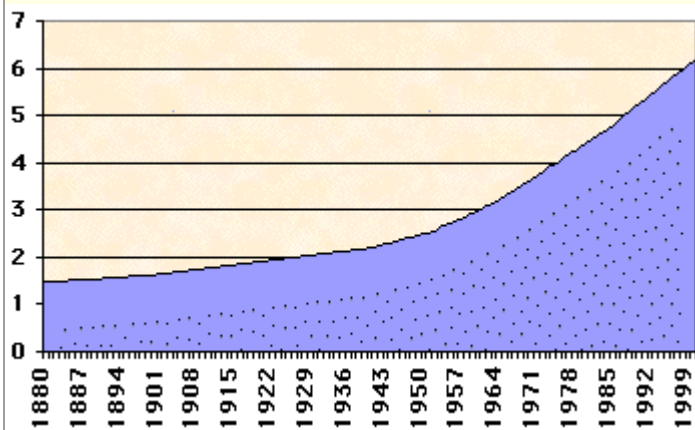
Traduction : **Mtoe** = millions de tonnes d'équivalent pétrole, **coal** = charbon, **oil** = pétrole, **gas** = gaz, **nuclear** = nucléaire, **renewable** = renouvelables, **other** = autres.

On voit très clairement que les sources non fossiles (nucléaire, hydroélectricité) sont très minoritaires. **Attention** : les renouvelables comprennent le bois de chauffage, qui, sans replantation (ce qui est le cas dans les pays tropicaux), ne devrait pas rentrer dans cette catégorie (puisque le bois n'est alors pas renouvelé !).

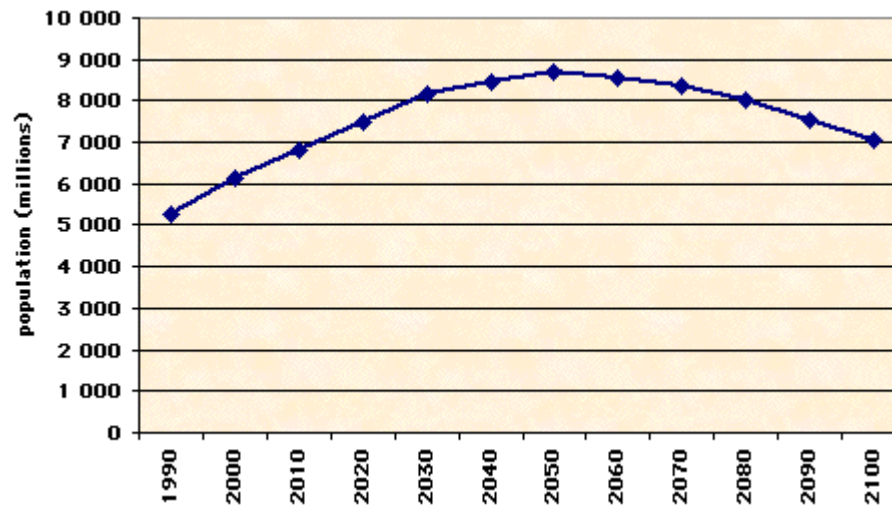
Source : [Agence internationale de l'Energie](#) .

La quasi-totalité de nos émissions de CO₂ - et une partie des émissions des autres [gaz à effet de serre](#) - sont issues de notre consommation énergétique. Or, tendanciellement, c'est à dire "si on continue comme maintenant", les consommations d'énergie vont fortement augmenter,

➤ sous l'effet de la croissance démographique de première part,



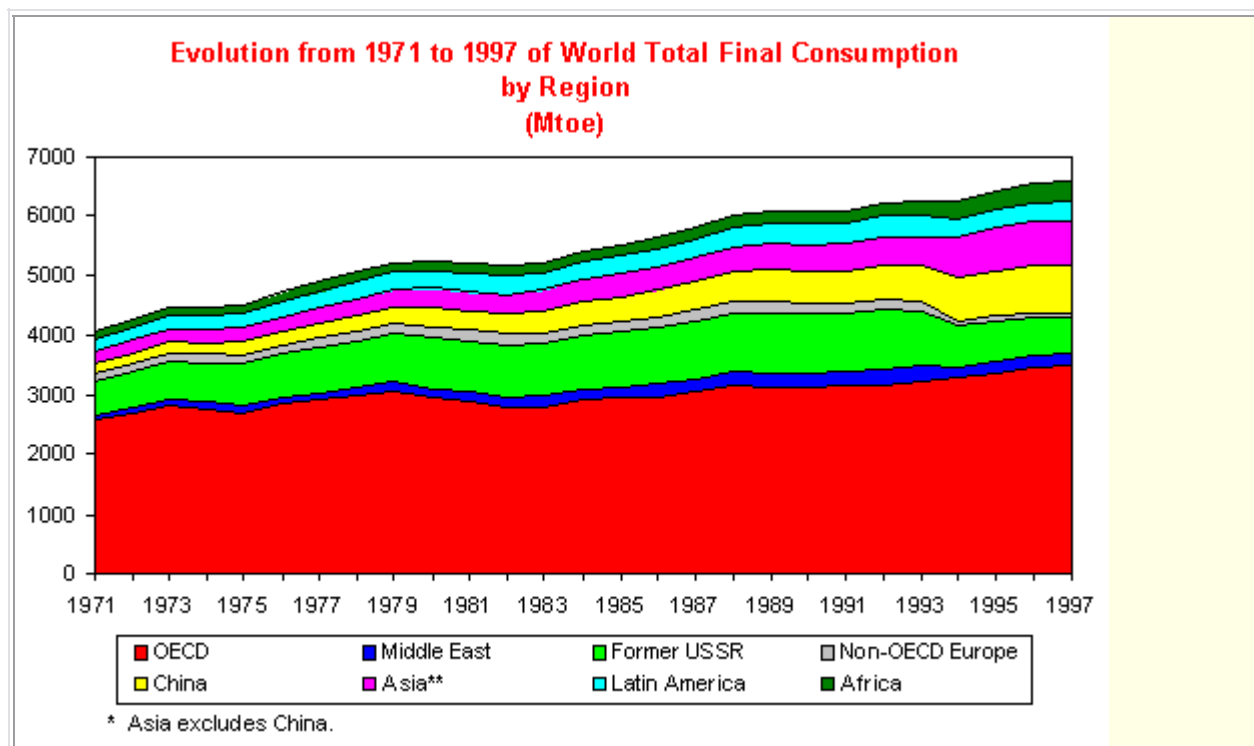
Evolution démographique mondiale constatée de 1880 à 2001, en milliards d'hommes. Source : Musée de l'Homme.



Un exemple d'évolution démographique projetée, en milliards d'hommes, jusqu'en 2100. Source : [GIEC](#).

NB : il y a bien sur plusieurs scénarios de croissance démographique possibles, et même une infinité ! Par exemple, un autre scénario du GIEC débouche sur 15 milliards d'hommes en 2100. Toutefois il s'agit toujours d'évolutions "douces", de telle sorte qu'il n'existe aucun scénario prévoyant une diminution rapide de la population dans les décennies à venir : aucun "prévisionniste" ne table sur une épidémie massive ou une guerre mondiale, deux éventualités parmi d'autres que pourtant personne ne peut déclarer comme impossibles. Un scénario n'est donc rien d'autre que la réponse à des hypothèses bien précises, et plus ou moins probables et exhaustives, et personne ne peut parler de "prévision exacte", par nature impossible à faire.

➤ sous l'effet de la croissance économique ensuite, sachant que la corrélation entre croissance de la consommation d'énergie et croissance économique est actuellement assez forte avec notre système socio-économique en vigueur (ce qui marche dans les deux sens : une bonne récession, il n'y a aujourd'hui rien de tel pour faire baisser la consommation d'énergie !)



Ce zoom sur les années récentes illustre le corrélation mentionnée ci-dessus : on constate facilement une brusque contraction de la consommation énergétique des pays composant l'ex URSS au début des années 90, juste après la chute du communisme (en vert clair), au moment où ces pays ont enregistré une très importante récession. Cette évolution est aussi marquée, quoique moins facile à lire sur le schéma, pour les anciens pays communistes d'Europe de l'Est (non-OCDE Europe). Les chocs pétroliers (lorsque le prix de l'énergie augmente, en 1974, 1979, 1990) ne conduisent qu'à une

stabilisation au niveau mondial, mais pas à une diminution significative.

Source : [Agence internationale de l'Energie](#) .

➤enfin d'un [souhait d'augmentation de la consommation d'énergie par habitant](#).

Pourquoi est-ce que nous aurons cette augmentation "en continuant comme maintenant" ?

Parce que, dans les pays occidentaux :

➤Nous consommons de plus en plus de produits manufacturés dont la fabrication coûte de l'énergie et engendre des émissions de gaz à effet de serre (c'est la fameuse "augmentation de la consommation des ménages", que tout le monde considère généralement comme étant une bonne nouvelle),

➤Nous nous déplaçons plus souvent et plus loin, et considérons cette possibilité comme un droit non négociable,

➤Nous mangeons de plus en plus de viande (enfin cette augmentation semble s'être un peu stabilisée récemment), or la production de viande, étonnamment, requiert une grande consommation d'énergie fossile ; "dans" un kg de boeuf il y a plusieurs kg d'hydrocarbures !

➤Bref la "croissance économique" (la fameuse croissance, qui est aussi considérée comme une bonne nouvelle) [a tendance à nous faire consommer plus d'énergie](#), même avec la "dématérialisation" de l'économie.

Et parce que, dans les pays "en développement" :

➤Les habitants aspirent à rouler en voiture, comme nous,

- ils aspirent à prendre l'avion, comme nous,
- ils aspirent à consommer beaucoup de biens de consommation, comme nous.
- ils aspirent à manger beaucoup de viande, comme nous (la consommation de viande a été multipliée par 5 en France de 1800 à 2000, et je suis prêt à parier une partie de mes économies qu'une évolution semblable s'est produite dans bon nombre de pays occidentaux).
- Bref ils aspirent à notre mode de vie, particulièrement à celui des américains, qui sont les plus gros consommateurs d'énergie par habitant de la planète, et qui, à travers leurs exportations audiovisuelles, qui sont les premières du monde, peuvent montrer leur manière de vivre à la terre entière.

A l'évidence, [nous ne saurions les empêcher d'augmenter leur consommation de manière pacifique sans changer nous mêmes nos modes de vie.](#)

Il existe de nombreux scénarios concernant la consommation d'énergie à l'avenir, et les émissions de gaz à effet de serre qui sont associées. On peut trouver sur une autre page de ce site internet une description sommaire des [scenarios utilisés par le GIEC pour alimenter les modèles climatiques](#), ou encore, sur une autre page, quelques réflexions sur les scénarios qui figuraient dans le ["Rapport du Club de Rome"](#).

Une remarque importante pour finir : les scénarios habituellement diffusés par les grands organismes internationaux (OCDE, World Energy Council, United Nations, etc) ne prennent en compte aucun "bouclage", c'est à dire que la consommation d'énergie n'est infléchi par aucun événement négatif qui découle précisément de la consommation d'énergie. Par exemple aucun scénario de ces grands organismes ne considère l'éventualité qu'une [conséquence déjà significative du changement climatique](#) vienne tellement perturber les activités humaines que la consommation d'énergie cesserait d'être une fonction croissante. Seul le Club de Rome avait tenté ce genre d'expérience, mais sa méthodologie n'a pas fait beaucoup de petits au sein des organismes sus-mentionnés.

En savoir plus : Les statistiques de l'[Agence internationale de l'Energie](#) ; celles du [World Energy Council](#)

Quels actes de la vie courante "font" de l'effet de serre ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

L'effet de serre, c'est bien connu, c'est la faute aux industriels, aux Américains, aux Chinois qui n'ont qu'à ne pas se mettre à consommer de pétrole, mais....surtout pas la mienne !

Hélas, nous sommes tous, au travers de nos actes quotidiens, des émetteurs directs ou indirects de [gaz à effet de serre](#), soit parce que nous brûlons directement un combustible fossile (pétrole, charbon, gaz), ce qui engendre des émissions de CO₂, soit parce que nous choisissons d'acheter un produit ou de consommer un service dont la fabrication engendre des émissions de gaz à effet de serre. S'exonérer totalement de notre responsabilité de consommateurs est probablement aller bien vite en besogne !

Je vous propose ci-dessous quelques ordres de grandeur d'émissions liées à des actes de la vie courante. Sauf exception, les chiffres incluent [tous les gaz à effet de serre](#). Tous ces chiffres sont obtenus à partir de la méthode [Bilan Carbone](#) que j'ai contribué à mettre au point pour le compte de l'[ADEME](#).

Pour donner un sens à tous ces chiffres, il sera utile de rappeler que l'**émission moyenne annuelle par Français est de 2,2 tonnes équivalent carbone** (unité de mesure des gaz à effet de serre) tous gaz confondus, en prenant en compte le [puits](#) constitué par la gestion des surfaces forestières en France. Il sera surtout utile de comparer ces chiffres à ce qu'il faut [émettre au plus pour stabiliser la concentration en CO₂ dans l'atmosphère](#)....

Se chauffer

Pour chauffer une maison, on émettra (essentiellement sous forme de CO₂) :

➤ avec du fioul, sur la base de 3.000 litres consommés : 2,4 tonnes équivalent carbone (en prenant en compte toutes les émissions liées à l'extraction du pétrole, son raffinage, et bien sûr sa combustion dans notre chaudière) ;

➤ avec du gaz naturel, pour la même quantité d'énergie fournie à la chaudière, soit 29.780 kWh : 1,9 tonne équivalent carbone (là aussi, en tenant compte des émissions liées à l'extraction et au transport du gaz naturel),

➤ avec de l'électricité, pour une quantité d'énergie dans le radiateur égale à celle fournie par 3.000 litres de fioul et un rendement de chaudière à 80% (ce qui correspond à 24.000 kW électriques environ), et en supposant que nous prenons les émissions moyennes du parc de centrales :

➤ 0,6 tonne équivalent carbone en France (où l'électricité est à 90% nucléaire et hydroélectrique) ;

➤ près de 3,8 tonnes en Grande Bretagne (30% de nucléaire, le reste à base de fossiles),

➤ environ 4 tonnes aux USA (20% de nucléaire, le reste comprend beaucoup de charbon).

➤ plus de 5,5 tonnes au Danemark (électricité essentiellement produite à base de charbon, malgré les éoliennes...) ou en Grèce (beaucoup de charbon aussi).

Il est important de préciser qu'en hiver, moment où l'on se chauffe à l'électricité, on utilise en appoint des centrales à charbon (en France), ce qui pose un problème de méthode pas simple : à qui attribue-t-on les émissions de carbone liées à la mise en marche des centrales à charbon ?

➤ au chauffage électrique, disent ses adversaires,

➤ à tout le monde, disent les autres, car il n'y a pas que le chauffage dont l'usage augmente l'hiver, et de toute façon les radiateurs électriques consomment deux fois plus que ce qui est produit par les centrales à charbon, donc chaque radiateur ne peut pas être considéré comme "tout charbon" !

De fait, la situation [mérite plus qu'une analyse rapide](#)....

Se déplacer

Pour un déplacement de 15.000 km (en France, une automobile parcourt en moyenne 14.000 km par an), on émettra, selon le mode de transport utilisé :

➤ **en voiture essence de petite cylindrée**, à la campagne, donc sans embouteillages, sur une base de 5 litres aux 100 : environ **0,8 tonne équivalent carbone**, en tenant compte de la fabrication de la voiture et des émissions du raffinage de l'essence. Par contre la combustion d'hydrocarbures produit aussi des précurseurs de l'ozone (2.000 fois plus "réchauffant" que le CO₂) et des oxydes d'azote non pris en compte dans mes calculs.

➤ **en voiture de grosse cylindrée**, en zone urbaine (avec une partie du trajet comportant des embouteillages), sur une base de 14 litres aux 100 : environ **2 tonnes** équivalent carbone (en outre les grosses voitures parcourent un kilométrage annuel supérieur aux petites : elles font plus près de 20.000 km par an que de 15.000).

➤ **en RER** (banlieusard allant travailler à 30 km de son domicile) ou en train (10 allers-retours Paris Marseille) : **seulement 35 kg** équivalent carbone par personne, sans tenir compte de la fabrication du train (c'est 5 à 10 fois plus à l'étranger sauf en Suisse et en Suède), soit **20 à 30 fois moins qu'une personne seule petite voiture**.

➤ **en avion court courrier** (10 aller-retours Paris Marseille) : environ **1,2 tonne équivalent carbone** par personne (en tenant compte de tous les gaz) en seconde classe, soit **40 fois plus qu'en train**, et même 2,7 tonnes équivalent carbone en classe affaires ! (car en classes affaires on occupe plus d'espace au sol).

➤ **en avion long courrier** (un aller-retour Europe-USA) : environ **0,9 tonne de carbone** par personne (en tenant compte de tous les gaz) en seconde, mais 3,15 tonnes en Première (et en Concorde c'était probablement encore plus !), soit **25 à 80 fois plus qu'en bateau** (avec lequel on émettrait 40 kg équivalent carbone environ).

On constate immédiatement que, en avion, chaque passager émet l'équivalent de ce qu'il aurait fait seul en petite voiture sur la même distance. **Un 747 sur Paris-New-York c'est donc l'équivalent de 450 à 500 Twingo qui parcourent 12.000 km.**

J'ai aussi calculé qu'un aéroport comme Roissy était indirectement à l'origine de quelque chose compris [entre 5 à 10% de nos émissions nationales](#).

Manger

Agriculture :

- la production d'une tonne de blé engendre environ 110 kg équivalent carbone, provenant pour 25% du N₂O issu des engrais et pour 75% du CO₂ issu de la production des engrais et des pesticides et du carburant du tracteur,
- produire une tonne de carcasse de boeuf (c'est dire la "viande avec os") engendre environ 4 tonnes équivalent carbone (plus de 10 pour le veau), provenant pour partie du méthane engendré par la digestion, et pour partie des émissions liées à la culture des céréales et fourrages pour le nourrir, sachant qu'en France l'essentiel de la culture céréalière sert à nourrir des animaux,
- pour une tonne de viande de volaille, 0,5 à 1,5 tonne équivalent carbone selon la volaille et sa qualité.

Produire puis livrer

Matériaux de base :

- la fabrication d'une tonne d'acier produit environ 0,8 tonne équivalent carbone (à partir de minerai), d'aluminium environ 3 tonnes équivalent carbone (aussi à partir de minerai), tous [gaz à effet de serre](#) pris en compte.
- la fabrication d'une tonne de plastique engendre de 0,5 à 1,6 tonne [équivalent carbone](#) selon le type de plastique,

- la fabrication d'une tonne de verre neuf engendre environ 0,4 tonne, mais de seulement 0,12 tonne si on part de calcin (verre récupéré puis pilé)
- la fabrication d'une tonne de ciment engendre environ 0,25 tonne équivalent carbone,
- la "fabrication" d'une tonne de bois stocke environ 0,5 tonne équivalent carbone. Utiliser une tonne de bois d'oeuvre à la place d'une tonne d'acier (par exemple pour un bâtiment) permet une économie (un "puits") de plus d'une tonne équivalent carbone au total si le bois provient de forêts européennes (car il faut que le bois soit replanté pour que la gestion forestière soit un puits, sinon il s'agit de déforestation !).

Transport de marchandises :

- le transport d'une tonne de fruits venant d'Espagne (1.000 km) en semi-remorque engendre environ 25 kg équivalent carbone (ce chiffre tient compte du taux moyen de trajets à vide effectués par les poids lourds, ainsi que du taux moyen de remplissage du camion) ;
- une tonne de pommes venant du maraîcher du coin en utilitaire léger (25 km) engendre environ 3 kg équivalent carbone,
- une tonne de mangues venant d'Afrique du Sud par avion (et parcourant 10.000 km en chiffres ronds) engendre 3,2 tonnes équivalent carbone,
- une tonne d'oranges venant de Tunisie par avion engendre environ 1,2 tonnes équivalent carbone,
- une tonne de courrier Paris-Nice par train de nuit (que la Poste a abandonné il n'y a pas longtemps) engendrait 2 kg équivalent carbone, en camion elle en fera environ 20 kg, et en avion (chronopost ou équivalent) 550 kg (250 fois plus qu'en train !).

Encore une fois, tout ce qui transite par l'avion engendre des émissions considérablement plus importantes que par tout autre moyen de transport, mais cela ne rend pas le camion (et même le train dans certains pays d'Europe) "climatiquement vertueux" pour autant !

Bien sûr, toutes ces indications correspondent à des valeurs moyennes, et sont susceptibles (notamment pour l'alimentation) de varier en fonction des circonstances. On peut trouver sur ce site quelques considérations sur les [actes individuels qui permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre](#)

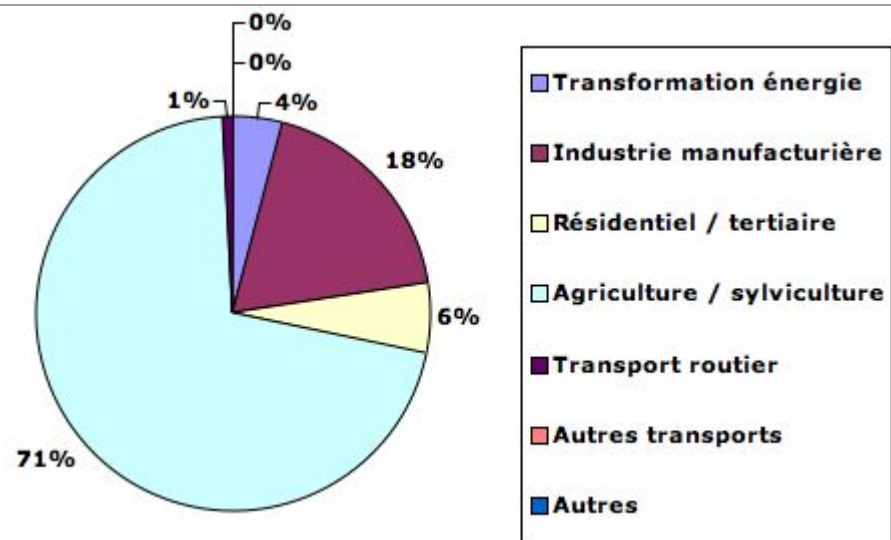
A la suite de la lecture de ces quelques chiffres, j'espère que le lecteur acceptera qu'il semble difficile que les émissions puissent être [fortement réduites](#) par l'action de je ne sais quel homme politique courageux et clairvoyant, qui n'aurait qu'à "faire ce qu'il faut" pour que les émissions baissent, sans que nous nous privions de consommer ce qu'il nous plaît pour autant....

Combien de gaz à effet de serre dans notre assiette ?

dernière version : mars 2006

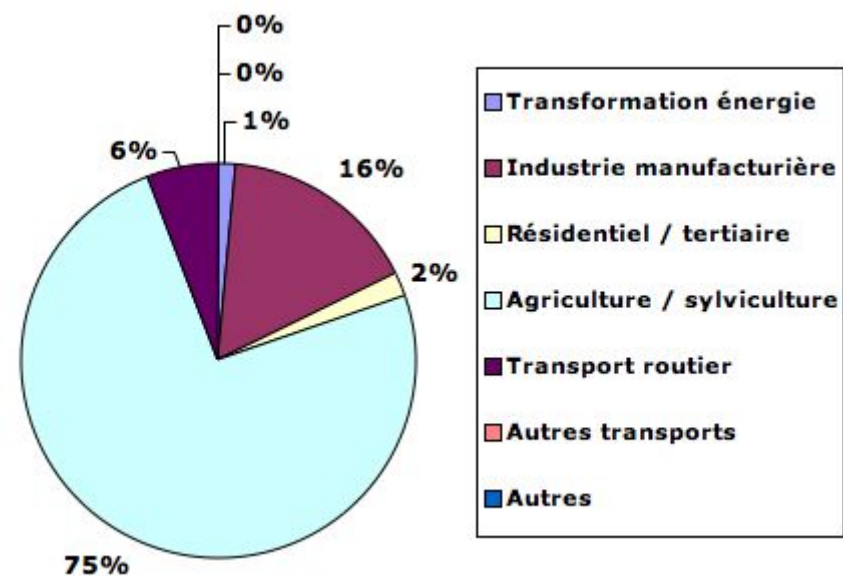
site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Le fait de manger engendrerait des émissions de gaz à effet de serre ? Allons donc..... Et pourtant, le fait de manger pèse très lourd, en France, dans les émissions de gaz à effet de serre. Nous devons cela au fait que l'agriculture est responsable de l'essentiel des émissions pour les [gaz à effet de serre](#) autres que le CO₂ : méthane et protoxyde d'azote.



Contribution des diverses activités aux émissions de méthane (CH_4) en France en 2004. L'agriculture contribue pour plus des deux tiers. (*) les transports internationaux ne sont pas comptés dans le total.

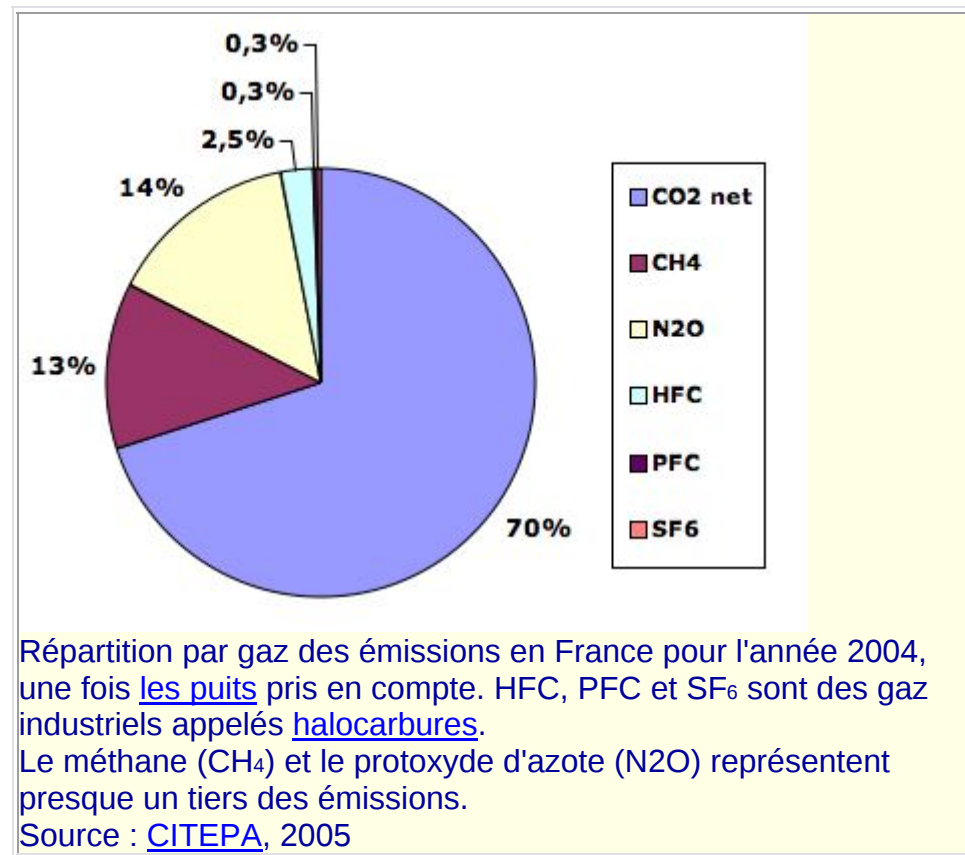
Source : [CITEPA](#), 2005.



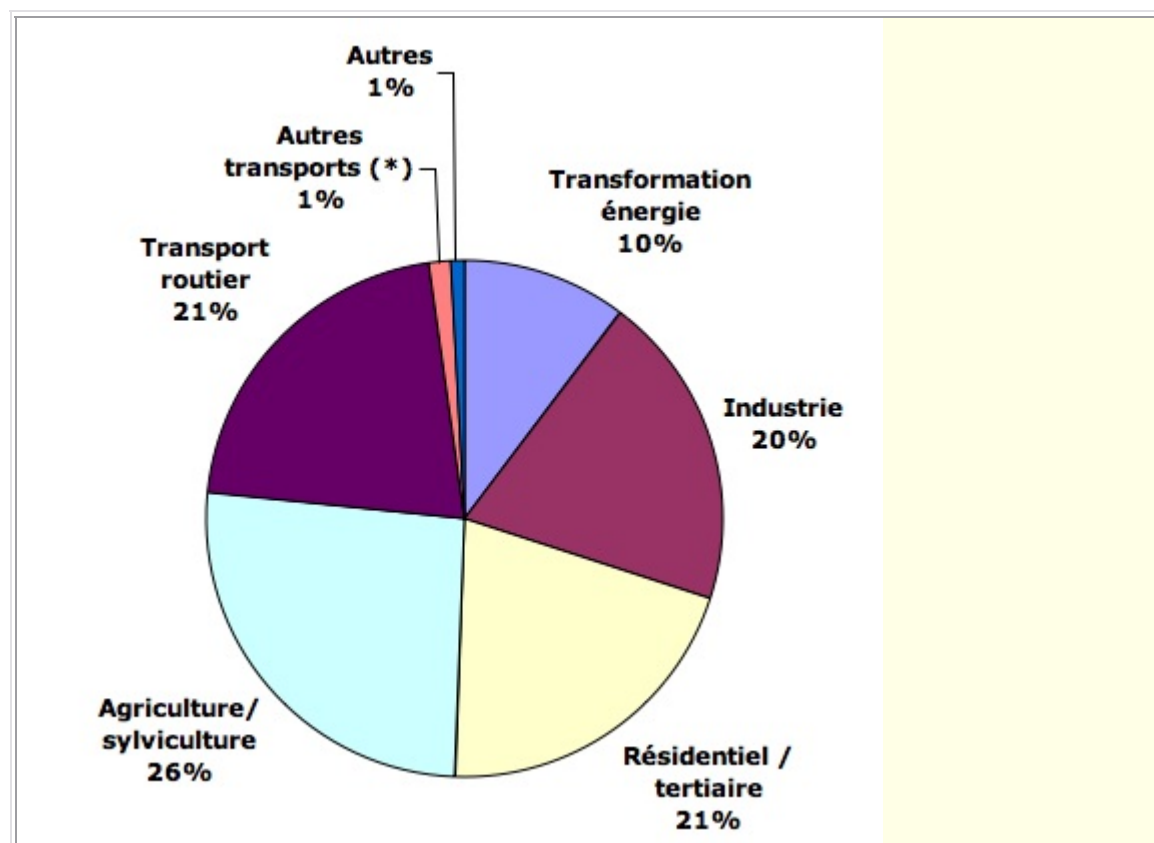
Contribution des diverses activités aux émissions de protoxyde d'azote (N_2O) en France en 2004. L'agriculture contribue pour près des trois quarts de l'ensemble.

Source : [CITEPA](#), 2005.

Par ailleurs, ces deux gaz (méthane et protoxyde d'azote) sont aujourd'hui responsables de près d'un tiers des émissions de gaz à effet de serre en France.



Sans grande surprise, la combinaison de ces deux informations amène l'agriculture à occuper la première place dans les émissions nationales si nous tenons compte de tous les gaz qui ont des émissions directes (ce qui exclut l'[ozone](#)).



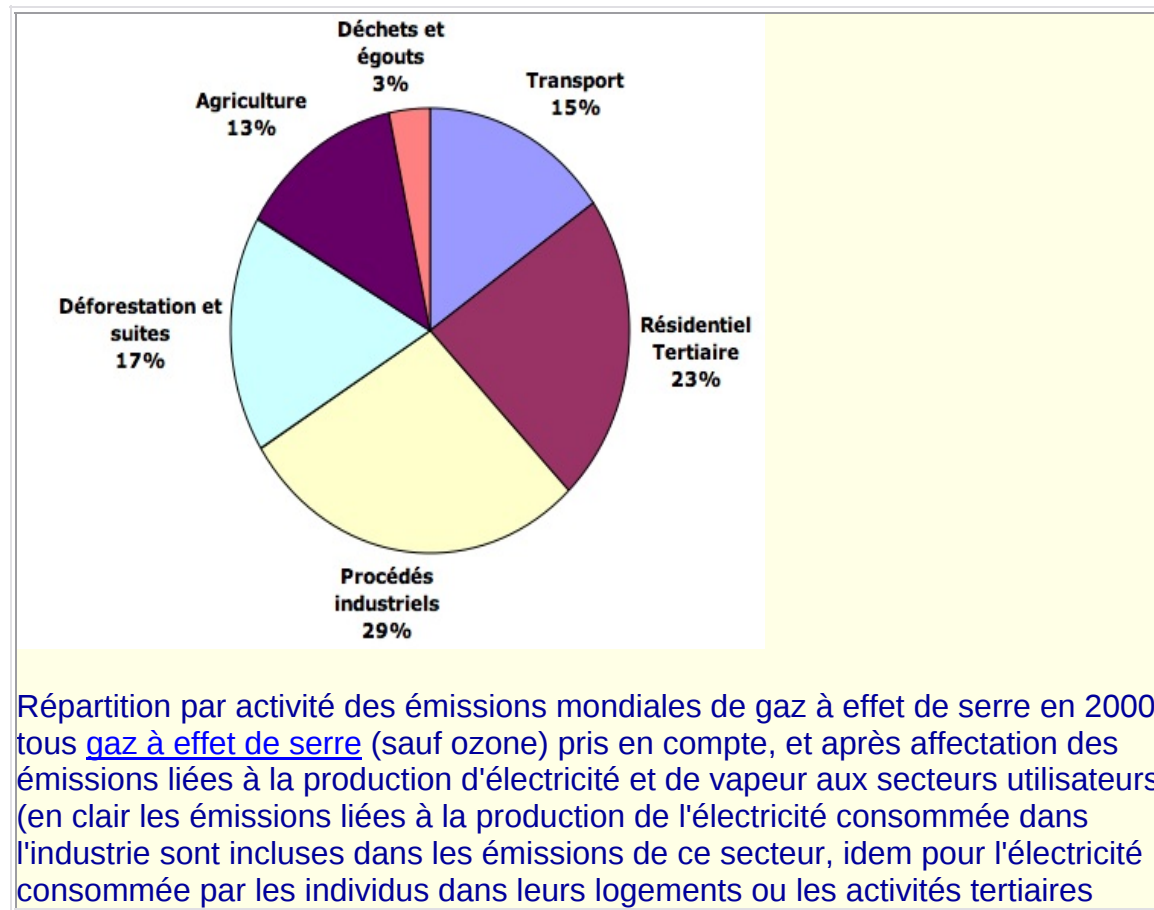
Répartition par activité des émissions en France pour l'année 2004, tous [gaz à effet de serre](#) (sauf ozone) pris en compte. Il s'agit des émissions brutes (je ne sais pas imputer les puits par activité !).

On remarque que **la première source devient alors l'activité agricole au sens large.**

Source : [CITEPA](#), 2005

(*) le transport aérien international n'est pas pris en compte.

Et si nous repartons au niveau mondial, cette place significative de l'agriculture reste valable, comme le montre cette décomposition par activité des émissions mondiales en 2004.



dans leurs bureaux, etc) . Il s'agit des émissions brutes.

Pour le monde comme pour la France, **la première source est aussi l'activité agricole** (déforestation incluse).

Sources primaires : [AIE](#), 2001, et [GIEC](#), 2000 ; petits calculs faits par votre serviteur

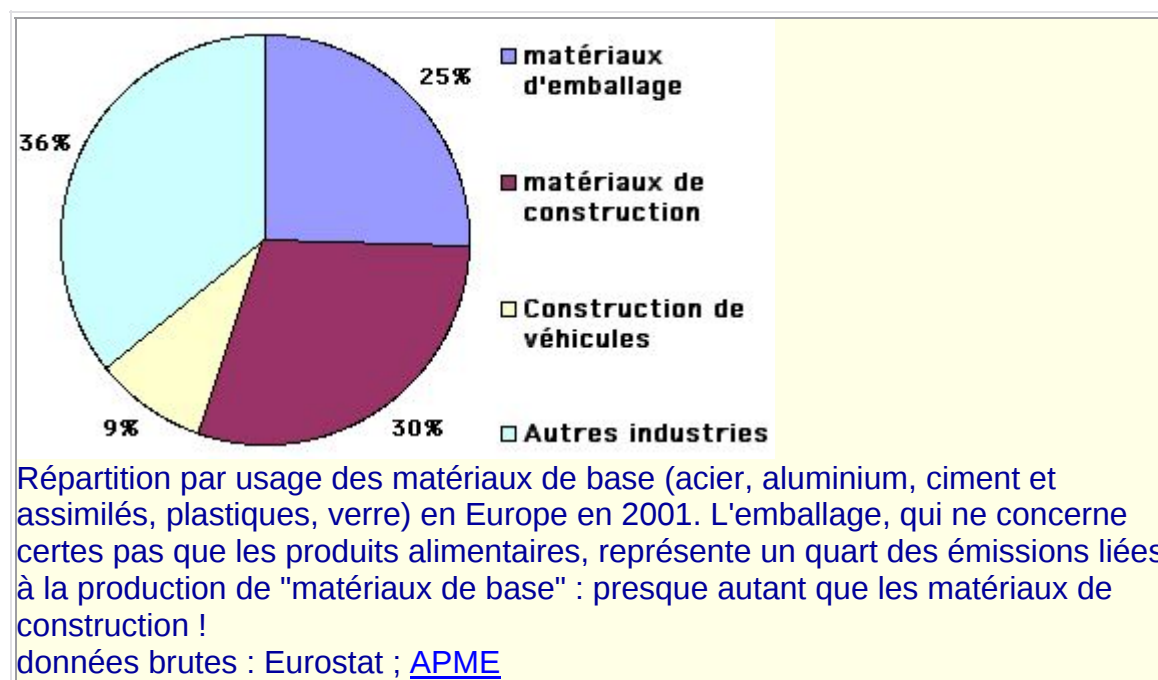
Mais si nous voulons compter de manière exhaustive ce qui est nécessaire à notre alimentation, il faut regarder de manière un peu plus large que les seules émissions directes de l'agriculture. En effet :

➤ toute l'agriculture, à l'exception des surfaces cultivées en bio, consomme des engrais et des pesticides de synthèse, qu'il faut produire, et cela requiert de l'énergie fossile, donc engendre des émissions de CO₂ (les engrais de synthèse sont produits à partir du gaz naturel : an seuns propre, nous mangeons du gaz et du pétrole !).

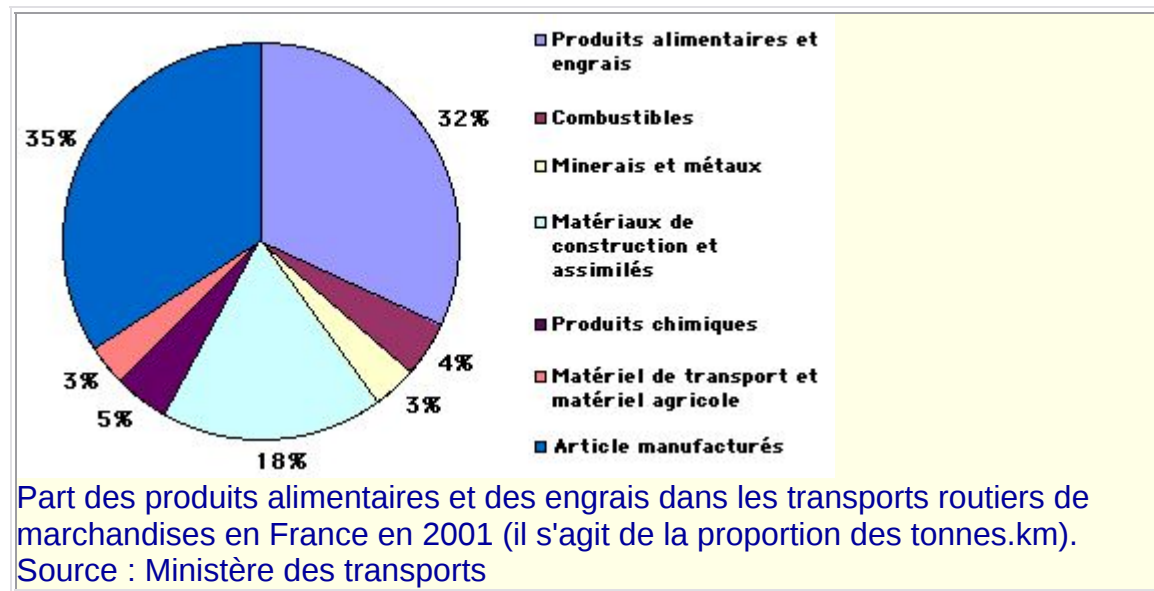
Si nous raisonnons à l'hectare, les engrais de synthèse représentent l'essentiel des émissions amont, les pesticides étant beaucoup plus marginaux pour les émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs les réactions chimiques intermédiaires de la production des engrais engendrent aussi du N₂O. Bien sûr, les émissions liées à la fabrication de ces produits ne sont pas comptées dans le poste "agriculture", mais dans le poste "industrie", et en plus nous ne produisons, en France, qu'une partie des engrais de synthèse que nous utilisons, ce qui fait que les émissions correspondantes seront comptées dans le total national d'un autre pays (tant pis pour eux !).

➤ les dépenses consacrées à l'achat de produits "bruts", par exemple des légumes ou des fruits frais en vrac, ou de la viande fraîche, ne représentent plus que 20% de l'ensemble de ce que nous consacrons à l'alimentation (en moyenne). Le reste de nos dépenses est consacré à des productions de l'industrie agro-alimentaire : pâtes, conserves, surgelés, plats préparés, biscuits et confiseries, boissons, etc. Or ces industries consomment de l'énergie en direct, et donc émettent des gaz à effet de serre qui seront "inclus" dans les produits que nous achèteront ensuite : en France, 15% de la consommation d'énergie de l'industrie est le fait des industries agroalimentaires.

➤ ensuite ces produits sont généralement emballés. Il se trouve que la fabrication d'emballages consomme une fraction significative des matériaux "de base" que nous produisons (acier, aluminium, plastiques, etc). Tous usages confondus, cette production de matériaux de base est responsable de 70% à 80% des émissions de l'industrie, avec donc une partie de cet ensemble qui se retrouvera dans ce que nous achetons au supermarché.



➤ continuons notre inventaire : une partie significative des transports routiers de marchandises concerne les produits alimentaires,



Comme on peut le voir sur le graphique ci-dessus, un tiers des camions qui nous font tant pester sur les routes transportent des produits finis ou intermédiaires de l'activité agricole. Il peut s'agir d'animaux vivants, de fourrages, de laits, de surgelés, etc. Incidemment, il est bien évident qu'à chaque fois que nous achetons des oranges espagnoles ou des raisins produits à 500 km du lieu d'achat, nous achetons du même coup le transport qui va avec, dont nous pouvons difficilement nous plaindre ensuite ! Le graphique ci-dessus ne tient pas compte des émissions liées au transport aérien ou maritime, pour lesquels je n'ai pas de données,

►enfin l'achat de ces produits transformés s'effectue souvent dans des grandes surfaces (alors que les marchés vendent majoritairement des produits frais), ce qui engendre des consommations énergétiques supplémentaires :

- il faut de l'électricité pour conserver les surgelés, surtout dans des présentoirs ouverts sur l'extérieur et des clients qui ne veulent pas se promener en manteau dans le magasin !
- il faut chauffer le magasin l'hiver et le climatiser l'été : l'énergie de chauffage et de climatisation des magasins représente, en France, entre 1,5 et 2 millions de tonnes équivalent carbone (électricité incluse, mais celle-ci ne conduit pas à de grosses

émissions puisqu'en France [presque tout est fait avec du nucléaire et de l'hydroélectricité](#)), c'est-à-dire entre 1 et 2% des émissions nationales.

► les grandes surfaces, qui absorbent 80% du commerce de détail de produits alimentaires (environ) sont souvent situées en périphérie de ville, donc nous y allons en voiture (ces émissions là ne sont pas comptées ici).

► et à la maison, il faut continuer à dépenser de l'énergie : réfrigération et congélation, cuisson, et même la râpe électrique des carottes ! La consommation électrique liée à l'alimentation (réfrigérateurs, congélateurs, lave-vaisselle, cuisson, sans compter le petit électroménager) représente 22% des kWh domestiques,

► puis nos emballages finissent à la poubelle, et là encore nous avons des [émissions de gaz à effet de serre pour le traitement de fin de vie](#) (même en cas de recyclage).

► enfin 25% du poids de ce que nous jetons est constitué de déchets alimentaires, et lorsqu'ils vont en décharge ces déchets conduisent à des émissions de méthane, probablement pas négligeable dans les émissions des déchets prises dans leur ensemble.

Combien de gaz à effet de serre ca fait, tout ca ?

Si nous essayons maintenant de faire un total de tout ce qui précède, cela nous amène au tableau qui suit, encore perfectible, mais qui donne une idée des postes :

Poste	Millions de tonnes équivalent carbone	Observations
Emissions directes	46	

de l'agriculture		
Fabrication des engrais	0,8	part française seulement. les émissions de fabrication totales sont peut être doubles ou triples.
Transports routiers de marchandises	4,0	part française
Transports routiers de personnes	1	Il s'agit d'une estimation personnelle prudente, car je suis incapable de connaître la part des déplacements en voiture qui correspond aux courses alimentaires. Les voitures émettent au total 20 millions de tonnes équivalent carbone, et le chiffre infiqué suppose que 5% correspondent aux courses alimentaires.
Fabrication des camions et raffinage du gasoil	0,8	
Chauffage des magasins alimentaires (20% du total)	0,4	
Usages "alimentaires" de l'électricité	0,7	
Fabrication des emballages	1,5	estimation de l'auteur à partir de statistiques CEE
Gestion de fin de vie des emballages	1	Les émissions gloables du secteur des déchets sont de l'ordre de 4 millions de tonnes équivalent carbone, et donc le chiffre retenu suppose que 25% viennent de l'incinération des emballages en plastique ou de la fermentation des déchets alimentaires.
Emissions de méthane des déchets alimentaires		
total des émissions rattachées à	56	

l'alimentation		
Emissions françaises en 2004 (CITEPA)	177	Il s'agit des émissions brutes
Part des émissions liées à l'alimentation	31,6%	Sans tenir compte des décharges, qui accueillent les résidus fermentescibles (qui "pourrissent"), ce qui engendre des émissions de méthane, et qui est en quelque sorte lié à l'alimentation

En gros, la conclusion est que si nous prenons tout en compte, nous sommes plus près du tiers que du quart des émissions françaises pour ce qui est de nous remplir nos estomacs ! Bien sûr, en toute rigueur il faudrait retraiter toutes ces émissions pour tenir compte des exportations (pour lesquelles les émissions sont à imputer aux estomacs des autres) et des importations (qui, avec mon calcul, nous permettent de nous remplir la panse sans qu'il nous en coûte un gramme d'émissions dans le total national), mais enfin nous ne devons pas être très loins de la vérité quand même.

Combien de gaz à effet de serre dans tel ou tel aliment ?

Ajouter des émissions "nationales" n'est pas le seul exercice auquel nous pouvons nous livrer avec les émissions de gaz à effet de serre liées à l'alimentation. Une autre calcul qui n'est pas sans intérêt est de savoir "combien de gaz à effet de serre" ont été nécessaires pour disposer d'un kg de nourriture, sans se préoccuper de savoir si les émissions ont eu lieu chez Pierre, Paul ou Jacques.

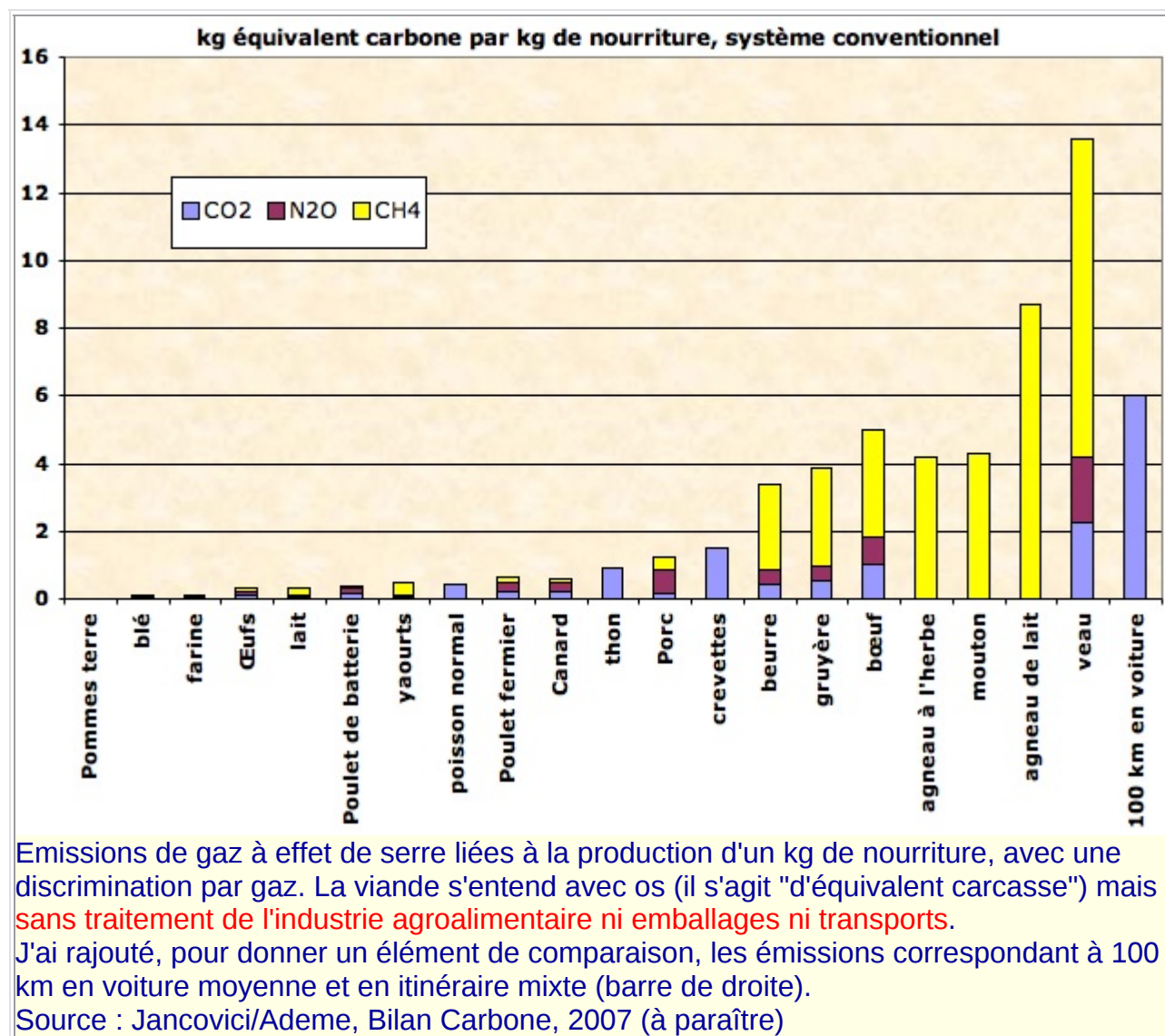
Si nous souhaitons savoir "combien de gaz à effet de serre sont nécessaires pour nous permettre de manger un kg de poulet de batterie, nous devons tenir compte, au prorata de ce qui a été nécessaire pour obtenir notre bétail (une telle approche s'appelle une analyse de cycle de vie) :

➤des émissions provenant du chauffage du local d'élevage,

- de l'énergie fossile utilisée par le tracteur pour la culture des céréales mangées par la bête,
- de l'énergie fossile nécessaire pour fabriquer les engrais qui serviront à cultiver les céréales mangées par la bête,
- des émissions de N_2O lorsque ces engrais seront épandus dans les champs (voir [page sur les gaz à effet de serre](#)),
- de l'énergie fossile nécessaire pour fabriquer les aliments du poulet (les poulets de batterie mangent rarement les céréales "brutes", mais plutôt des aliments préparés par un sous secteur de l'industrie agroalimentaire) à partir des céréales cultivées,
- et encore des émissions liées à la fabrication des engins agricoles, de l'énergie fossile de séchage des grains, et même de l'énergie qui a été nécessaire pour raffiner le pétrole qui sera consommé par le tracteur....

Enfin, si l'aliment est issu d'un ruminant (lait, viande de vache, etc) il faut aussi tenir compte des rots de ces grosses bêtes. En effet, les ruminants ont une intense fermentation dans leurs estomacs (je rappelle qu'une vache a 4 estomacs !) qui produit du méthane, et je rappelle aussi qu'en France, le poids des vaches est supérieur au poids des hommes : nous avons 20 millions de bovins en France, dont le poids moyen est de quelques centaines de kg.

Les résultats d'une telle analyse des émissions "du champ de pétrole à l'estomac du consommateur" (en ordre de grandeur, chaque barre est précise à $\pm 50\%$) sont présentés ci-dessous :

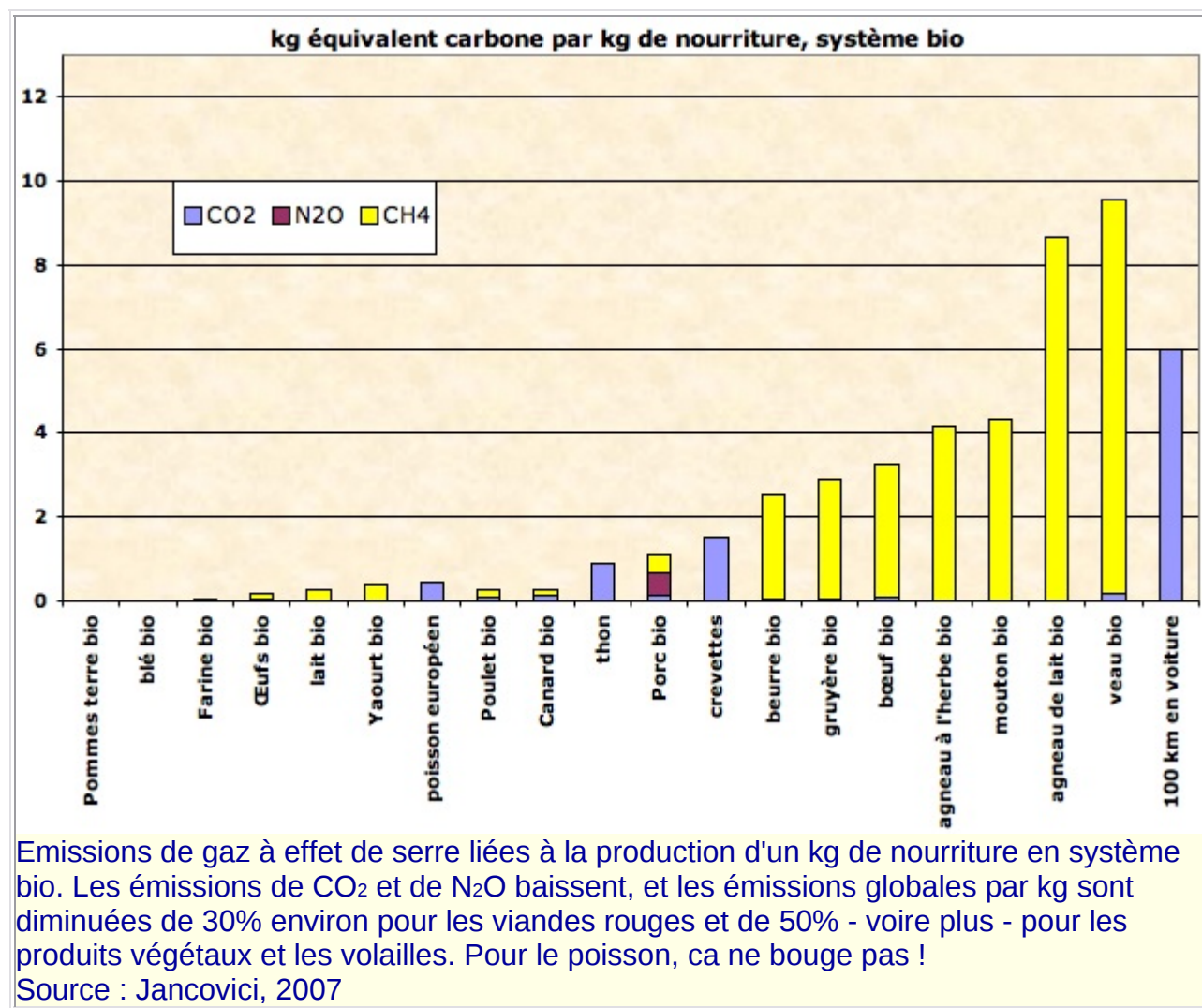


Le bio, c'est beaucoup mieux pour le changement climatique ?

Que se passe-t-il quand on se met à cultiver bio ?

- on évite l'énergie fossile nécessaire à la fabrication des engrais de synthèse, qui sont interdits dans le système bio, et donc certains postes d'émission disparaissent,
- idem pour les phytosanitaires,
- il y a quand même des émissions de N_2O liées à l'épandage des fumiers et autres apports d'azote,
- les rendements sont moins élevés, alors que les heures de tracteur sont à peu près les mêmes, et donc les émissions de CO_2 par unité de production augmentent pour certains postes.
- enfin, bio ou pas bio, les ruminants continuent à roter du méthane !

Si nous faisons un bilan de tous ces effets contraires, nous parvenons au schéma suivant



La triste vérité est donc la suivante : manger bio c'est bien, mais pour le climat il faut surtout manger moins de viande (ce qui du coup rend plus facile de la manger bio, et autant ne pas s'en priver !). En outre [manger autant de viande que maintenant interdit la](#)

[conversion d'une large partie de l'agriculture au bio](#), car à cause de la baisse des rendements (pour la culture des céréales et fourrages mangés par les animaux) il faudrait bien plus de surface agricole que nous n'en avons de disponible, surtout si en prime on doit [faire des biocarburants](#)....

Combien de gaz à effet de serre dans notre poubelle ?

dernière version : septembre 2003

source : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Nous jetons chaque jour un peu plus de déchets ménagers (et ce "un peu plus" au quotidien fait rapidement "beaucoup plus" : nous avons augmenté ces déchets de 33% en 10 ans seulement, c'est considérable !) :

Évolution de la production des déchets ménagers. Comparaison européenne				
Pays	Déchets ménagers (milliers de tonnes)		Déchets ménagers par habitant (kg)	
	1980	1990	1980	1990
France	15.570	20.320	290	360
Allemagne	21.417	21.172	348	333
Royaume Uni	15.500	20.000	312	348
Italie	14.040	20.033	252	348
Espagne	10.100	18.540	270	322

source : [rapport Miquel du Sénat](#) sur le recyclage des déchets ménagers

Ces déchets comportent certes des épluchures de patates, mais surtout beaucoup de produits provenant de l'industrie :

Composition des ordures ménagères		
Nature de déchets	en %	kg/hab/an
Déchets putrescibles	28,8%	125
Papier	16,2%	70
Carton	9,1%	39
Plastiques	11,1%	48
Verre	13,1%	57
Métaux	4,1%	18
Incombustibles	6,8%	30
Combustibles divers	3,2%	14
Textiles	2,6%	11
Textiles sanitaires	3,1%	13
Complexes	1,4%	6
Spéciaux	0,5%	2
TOTAL (1997 ou 1998)	100%	434

Source : [ADEME](#), Déchets municipaux, les chiffres clefs - février 1998

Il est facile de constater que les déchets organiques ne constituent qu'une petite partie de ce que nous jetons !

Or la production et le travail de tous ces matériaux que nous finirons par jeter a consommé de l'énergie et engendré des émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, pour faire un produit en acier à partir de minerai de fer, il faut effectuer les actions suivantes, dont chacune conduit a effectivement des émissions de gaz à effet de serre :

- ▶extraire le minerai,
- ▶le transporter,
- ▶le réduire avec du charbon (c'est cette opération, faite dans un haut-fourneau, qui engendre le gros des émissions),

- ▶ le purifier (à l'oxygène par exemple),
- ▶ le laminer ou l'étirer,
- ▶ transporter l'acier produit jusqu'à son lieu de 2^e transformation (pour en faire des cannettes boisson ou des portières de voiture),
- ▶ effectuer la 2^e transformation,
- ▶ et enfin transporter le produit fini jusqu'au magasin.

A chaque stade on peut associer des émissions, plus ou moins bien identifiées. Le problème de méthode essentiel survient lorsqu'une même opération sert à plusieurs choses à la fois. Par exemple, si un bateau transporte en même temps des machines à laver et des serviettes-éponge, il faut décider d'une règle pour partager les émissions du bateau entre les éléments de la cargaison (au poids ? au volume ?), et ce n'est pas toujours évident.

Cette précaution rappelée, voici des ordres de grandeur d'émissions (en kg équivalent carbone, tous gaz à effet de serre pris en compte) liés à la production d'une tonne de matériau de base :

Matériau	kg équivalent carbone par tonne produite (valeurs européennes)
Acier à partir de minerai	850
Acier à partir de ferrailles	300
Aluminium à partir de minerai	3.000
Aluminium à partir de ferrailles d'alu	600
Verre plat	400
Verre bouteille	120

Plastique de base (polyéthylène, polystyrène, PCV, PETÉ)	500 à 1.600
Papier-carton	500
Ciment	250

Source : Jancovici/[ADEME](http://www.ademe.fr), 2003

Ainsi, quand nous achetons un kg d'acier d'emballage, supposé fait à partir de minerai, qui finira à la poubelle, nous serons à l'origine, au mieux, de 300 grammes équivalent carbone d'émissions si cet acier est recyclé (on voit donc que le recyclage ne signifie pas suppression de l'impact), et de 850 grammes au pire, si cet acier était neuf et n'est pas recyclé.

Mais les déchets sont à l'origine d'autres émissions :

- ▶ les déchets "putrescibles" (déchets organiques, papiers et cartons pour l'essentiel) qui sont mis en décharge conduisent à des émissions de méthane en se décomposant, or le méthane est un [gaz à effet de serre](#).
- ▶ les déchets "combustibles" (plastique, papier, carton) conduisent à des émissions de CO₂ lorsqu'ils sont brûlés, et pour le plastique, fait à partir de pétrole, il s'agit de carbone "fossile".

La valorisation permet cependant des économies :

- ▶ il est possible de récupérer les matériaux (acier, alu, papier...), mais cette récupération nécessite des processus qui conduisent quand même à des émissions (dans le cas du papier et du carton, le bilan d'ensemble est à peu près identique à une fabrication à partir de matériaux neufs !),
- ▶ il est possible de récupérer la chaleur de la combustion pour en faire de l'électricité ou du chauffage urbain,
- ▶ il est possible de récupérer le méthane des déchets qui fermentent pour en faire aussi de la chaleur ou de l'électricité.

Toutefois la valoriation ou le recyclage ne rendent en aucun le fait de jeter "neutre" : il reste de très loin préférable de ne pas jeter, donc d'acheter des produits peu emballés.

En tenant compte de la proportion des diverses filières en France (décharge, incinération, avec ou sans valorisation), et en prenant des valeurs moyennes pour les émissions de gaz à effet de serre liées à la production des divers matériaux que nous jetons, voici la quantité de gaze à effet de serre que nous allons trouver dans la poubelle d'un Français moyen:

Nature de déchets	kg/hab/an	kg equivalent carbone par kg jeté (*)	kg equivalent carbone
Déchets putrescibles	125	0,17	21
Papier - carton	110	0,58	64
Plastiques	48	0,9	43
Verre	57	0,28	16
Métaux	18	0,6	11
Autres	76	0,5	38
TOTAL	434	-	193

(*) cette valeur inclut à la fois les émissions de fabrication et les émissions de fin de vie (liées à l'incinération et la fermentation).

Il s'ensuit que notre poubelle "contient" environ 200 kg équivalent carbone par personne et par an environ soit un petit 10% des [émissions moyennes par Français](#). Diminuer fortement la quantité de choses que nous jetons - et par voie de conséquence la quantité d'emballages que nous achetons - représente donc une marge de manoeuvre qui, sans être suffisante, n'est pas totalement ridicule dans l'ensemble.

Combien de gaz à effet de serre chez moi ?

août 2002 - publié sous une forme un peu résumée dans *La Revue Durable* de novembre 2002 - dernière révision septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Depuis le temps que j'explique à qui veut l'entendre qu'il est indispensable de calculer combien telle ou telle activité émet de gaz à effet de serre, il fallait quand même que je me décide à faire de même pour moi ! Cette page vous propose un exemple de calcul des diverses contributions aux émissions de ma maisonnée, avec quelques commentaires que j'espère utiles pour bien cerner quelques marges de manoeuvre individuelles.

Ces chiffres ont été obtenus avec les valeurs par défaut contenues dans la [méthode "bilan carbone"](#) sur laquelle j'ai travaillé pour l'[ADEME](#). Le but du jeu n'est bien entendu pas de m'attribuer des bons points, mais juste de montrer où sont les principaux postes d'un particulier et donc, par voie de conséquence, où sont les marges de manoeuvre si nous souhaitons faire baisser ces émissions.

Energie pour le chauffage et le "confort tertiaire"

Ma famille habite une maison chauffée au gaz naturel. [Il s'agit toujours d'un combustible fossile](#) (non renouvelable), même si c'est le moins riche en carbone qui soit (et donc celui dont la combustion fait le moins de CO₂ pour une même quantité d'énergie fournie). Le relevé de nos factures de mi-2001 à mi-2002 indique une consommation annuelle de 32.000 kWh, ce qui signifie que, à raison de 225 grammes de CO₂ par kWh environ, la chaudière émet 7,2 tonnes de gaz carbonique par an, que je peux convertir en un peu moins de 2 tonnes équivalent carbone par an.

Le même gaz sert également au "confort tertiaire" (eau chaude, cuisson), donc toutes les douches (interminables chez ces dames) et toutes les cuissons de courgettes farcies sont comprises dans la facture en question.

Nous consommons également de l'électricité, pour un total de 4.800 kWh par an, dont la production a conduit à l'émission de 400 kg de CO₂, ou encore 111 kg équivalent carbone. Ailleurs dans la CEE, la même consommation d'électricité aurait engendré des émissions bien supérieures, l'essentiel de l'électricité y étant faite avec des centrales à fioul lourd, à charbon, ou à gaz.

Pays	Kg de CO₂ émis pour 4.800 kWh	% en plus par rapport à la France
Allemagne	2.912	615%
Autriche	1.211	197%
Belgique	1.623	298%
Danemark	4.269	948%
Espagne	1.977	385%
Finlande	1.933	375%
Grèce	4.186	928%
Irlande	3.799	833%
Italie	3.232	694%
Luxembourg	2.859	602%
Pays-Bas	3.159	676%
Portugal	2 544	525%
Royaume-Uni	2.810	590%
Suède	421	3%
USA	2.970	629%
Japon	2.340	475%

Lesquelles de nos actions passées ont fait baisser ces émissions ?

- Nous avons fait changer la chaudière à fioul - trouvée en entrant - pour une chaudière à gaz (à confort identique : gain de 2,3 tonnes de CO₂, ou encore 600 kg équivalent carbone), avec une régulation qui baisse la température la nuit,
- Nous avons fait poser des doubles vitrages partout,

➤Et surtout...nous avons sorti les pulls ! Il fait 18 à 19 °C dans la maison dans la journée, et 15 °C la nuit (cela étant c'est très supportable, et même bien plus agréable pour dormir).

Quelles sont nos marges de manoeuvre restantes ?

➤installer un chauffage solaire, au moins pour l'eau chaude (gain probable de 200 kg équivalent carbone, en ordre de grandeur, pour l'eau chaude ; 1 tonne équivalent carbone pour un chauffage complet, qui suppose d'installer des planchers chauffants partout).

➤Si nous habitons à la campagne : installer un chauffage central au bois (local) : gain de la quasi totalité du poste "chauffage",

➤renforcer encore l'isolation (gain de 10% à 20% probable, mais au prix de travaux importants),

➤baisser encore le thermostat (gain identique probable),

➤et finalement...déménager pour une maison plus petite !

Que pourrions nous au contraire faire pour augmenter nos émissions ?

➤revenir au fioul, ou au charbon,

➤demander à EDF d'abandonner le nucléaire, ou, si il devient possible de se fournir auprès d'une autre compagnie électrique qui possède des centrales à gaz (ou encore pire, à charbon), changer de fournisseur (en faisant cela je pourrais aller jusqu'à multiplier les émissions de ce poste par 10 !),

➤monter le thermostat et vivre en tee-shirt toute l'année,

➤agrandir la maison : cela engendrerait de grosses émissions pour la fabrication des matériaux de construction (voir [3è tableau de cette page](#)) puis un accroissement de la quantité d'énergie pour se chauffer,

➤installer une climatisation pour l'été.

Energie pour le travail

Les adultes de par chez nous comportent une femme et un homme (c'est d'un classique...). Ma femme, dite "au foyer", n'occupe donc pas un autre local dans la journée, et je suis travailleur à domicile, ce qui signifie également que je n'engendre pas d'émissions au titre de mon activité professionnelle en dehors de mon domicile. En effet, toute personne qui travaille en dehors de chez elle engendre une consommation d'énergie pour le chauffage du local où elle travaille et le confort tertiaire (eau chaude, cantine du personnel, ascenseurs, etc...) et il faut bien sûr en tenir compte dans les émissions par personne.

Les émissions correspondantes, pour ce qui me concerne, sont déjà comprises dans les factures de gaz et d'électricité pour la maison. Le fait de travailler à domicile (bien qu'au foyer, ma femme turbine drôlement aussi !) engendre donc un gain estimé à 1,8 tonne de CO₂ (0,5 tonne équivalent carbone) par adulte concerné. Pour les chiffres qui me servent de référence, voir [étude sur ce sujet](#).

Quelles sont nos marges de manoeuvre restantes ?

➤pas grand chose....

Que pourrions nous au contraire faire pour augmenter nos émissions ?

➤prendre un bureau à l'extérieur.

Energie pour les services publics

La scolarité étant obligatoire jusqu'à 16 ans (et généralement prolongée un peu au-delà) mes enfants vont à l'école. Cette dernière est chauffée, fait appel à des enseignants qui viennent en voiture, etc. Par ailleurs je paye des impôts (pas trop à mon goût, car je suis ravi d'avoir des services qui vont en face, mais je les paye assurément de manière trop compliquée parfois !), suis administré par une équipe municipale, suis défendu par une armée, etc, donc je "consomme" des services publics très variés.

Je ne sais pas exactement comment je peux m'imputer une partie des émissions engendrées par ces services, mais j'en suis assurément "propriétaire". Je ne serais pas étonné de savoir que quelques centaines de kg de CO₂ se "cachent" derrière cette consommation de services publics.

Quelles sont nos marges de manoeuvre restantes ?

➤difficile à dire !

Que pourrions nous au contraire faire pour augmenter nos émissions ?

➤mettre nos enfants en internat : il faut alors construire un internat, le chauffer, etc, et si dans le même temps nous ne déménageons pas pour une surface de maison plus petite, cela augmente les émissions globales,

➤et pour le reste, je n'en sais trop rien....

Transports

Nous disposons d'une voiture, qui nous sert pour environ 12.000 km/an à faire des déplacements longs (de type vacances) et, pour une faible part (disons 2.000 km/an), quelques déplacements de proximité. Elle consomme de l'ordre de 10 litres aux 100 sur autoroute (où nous faisons l'essentiel de nos transhumances) et je prends forfaitairement le double pour les déplacements de proximité (ce qui est probablement un peu trop, mais enfin cela permet de tenir indirectement compte des émissions liées à sa

fabrication et à la construction des routes). En tenant également compte des émissions des raffineries, cela conduit à environ 4 tonnes de CO₂ par an, soit 1.100 kg équivalent carbone.

Qu'avons nous déjà fait pour faire baisser ces émissions ?

➤ Nous avons choisi d'habiter en un endroit bien desservi par les transports en commun (je n'ai donc jamais de déplacements professionnels en voiture pour aller sur Paris, et cela limite aussi très fortement les besoins d'accompagnement en voiture des enfants), ce qui limite l'essentiel de notre kilométrage aux déplacements pour vacances,

➤ On retrouve ici le bénéfice du travail à domicile (gain probable de quelques centaines de kg équivalent carbone par rapport à la situation où je prendrais ma voiture pour aller travailler quotidiennement à 10 km de chez moi), et il est exceptionnel que je fasse des déplacements professionnels autrement qu'en RER ou en train (je ne prends plus l'avion pour le travail : si c'est trop loin, je n'y vais pas et j'utilise Internet !),

➤ On retrouve aussi ici le bénéfice.....de la femme au foyer ! C'est peut-être très peu politiquement correct à dire, mais c'est un fait que de ne pas aller "au travail" supprime la nécessité d'une deuxième voiture (que tous nos voisins dont les deux conjoints sont actifs possèdent), et du kilométrage correspondant : ce n'est pas rien....

➤ Nous effectuons nos déplacements de proximité (marché, supermarché, accompagnement des enfants à l'école...) à pied ou [à vélo](#) le plus souvent possible, (mais ma femme et moi avons parfois quelques divergences sur ce que devrait précisément recouvrir "le plus souvent possible" !)

➤ Nous essayons - et depuis 8 ans nous y parvenons - de ne plus prendre l'avion pour les loisirs (un aller-retour Paris-New York, c'est, **par personne**, quasiment 4 tonnes équivalent CO₂, ou encore [une tonne équivalent carbone](#)).

Quelles sont nos marges de manoeuvre restantes ?

➤ abandonner totalement la voiture pour les déplacements de proximité, souvent au prix d'un allongement du trajet, mais :

➤ quand on cherche c'est étonnant le nombre d'endroits qui sont desservis par des transports en commun (souvent des bus),

► augmentation du temps de déplacement ne signifie pas nécessairement perte de temps : j'en profite pour lire, travailler... toutes choses que je ne pourrais pas faire en voiture.

► partir en vacances en train !

Que pourrions nous au contraire faire pour augmenter nos émissions ?

► fastoche : acheter une deuxième voiture et ne rouler qu'en Range Rover ou en Porsche, être en permanence fourrés dans un avion (comme certains grands écologistes du reste !), déménager loin de tout....

Alimentation

Toute mise à disposition d'aliments engendre des émissions de gaz à effet de serre :

► les céréales, fruits et légumes nécessitent des engrais (l'agrochimie est une industrie très gourmande en énergie), de la force mécanique (tracteurs) donc de l'essence, du transport jusqu'au magasin, donc encore de l'essence, etc.

► la production de viande requiert une production végétale très importante : il faut quelques kg de céréales pour faire un kg de cochon ou de volaille de bonne qualité, mais surtout jusqu'à 50 pour faire un kg de boeuf.

► la pêche nécessite aussi de l'essence pour la bateau, puis pour le transport du poisson...

► tout produit de l'industrie agro-alimentaire (ca fait beaucoup de choses : pas seulement les boissons sucrées et les pizzas surgelées, mais aussi les yaourts, biscuits, pâtes, chocolat, café soluble, lait en bouteille, etc...) engendre aussi des émissions pour son traitement en usine : chaîne du froid ou cuisson/chauffage, fabrication de l'emballage, construction de l'usine et transports (marchandises et salariés) dans tous les sens.

J'ai eu la possibilité d'effectuer des approximation des émissions engendrées pour la production d'un kg d'aliments, et si j'applique cela à ce que je pense être nos achats annuels, j'obtiens le tableau ci-dessous.

Aliments	kg consommés par an pour la totalité du foyer	grammes équ. carbone par kg d'aliments	kg équ. carbone
Pain, pâtes et riz	250	200	50
Fruits et légumes	1.560	150	234
Boeuf	13	3.560	46
Veau	3	13.650	41
Mouton	5	3.560	18
Cochon	156	910	142
Lait de vache	548	270	148
Beurre	26	2.000	52
Fromage pâte crue	31	1.500	47
Fromage pâte cuite	52	3.000	156
Yaourts	274	490	134
Poulet fermier	156	850	133
Canard	5	680	3
Oeufs	44	450	20
Poisson	75	500	38
Total			1.261

Il faudrait probablement que je rajoute 10% à 20% pour l'huile d'olive, la moutarde, les quelques paquets de gâteaux et quelques tablettes de chocolat que nous achetons aussi...

Cela étant tout ce que nous mangeons est compris ou à peu près dans ce total : nos enfants mangent peu à la cantine, et nous n'allons pas restaurant tous les jours, donc les émissions liées à la production et la préparation des aliments "hors du domicile" sont marginaux dans le total.

Qu'avons nous déjà fait pour faire baisser ces émissions ?

- Nous mangeons de la viande une fois par jour seulement (mais un certain [Coffe dit que c'est bien suffisant](#) !) et surtout de la volaille et du cochon (beaucoup moins d'émissions par kg de poids).
- Presque tous les fruits et légumes que nous consommons sont de saison (pas de fraises, de tomates, de courgettes ou d'aubergines en février...), car sinon il faut les importer de pétaouchnock ou les faire pousser sous serre chauffée au fioul, ou les acheter surgelés, et tout cela engendre des émissions (de temps en temps nous faisons une petite entorse, quand même !),
- Nous achetons tout ce que nous pouvons aux producteurs locaux (maraîchers, volaillers au marché, etc), ce qui évite du transport longue distance (pas de haricots verts du Kenya ou de kiwis de Nouvelle Zélande arrivant par avion, ou même de fraises espagnoles par camion ; la seule exception notable concerne les oranges en hiver),
- Tous nos produits frais (fruits, légumes, viande, pain...) viennent de petits commerçants (notamment du marché), qui sont moins consommateurs de transports pour leurs approvisionnements que les grandes surfaces et ne nécessitent pas d'y aller en voiture (en outre, moins nous mettons les pieds à l'hypermarché, surtout si des enfants nous accompagnent, et moins nous achetons de choses inutiles, donc nous faisons même des économies !) : le supermarché ne sert que pour l'épicerie sèche (pâtes, chocolat, etc), les produits d'entretien et les laitages frais type yaourts (qu'il est devenu impossible de se procurer à doses non homéopathiques au marché).
- Nous n'achetons quasiment jamais de surgelés (la chaîne du froid est une très mauvaise affaire pour les émissions) ou de plats tout préparés (pour tous les plats tous prêts - surgelés compris - il faut fabriquer un emballage qui sera jeté et [cela engendre des émissions significatives](#)),

Quelles sont nos marges de manoeuvre restantes ?

➤ Devenir.....végétariens (gain de 0 à 2,5 tonnes équivalent CO₂ par personne, ou encore 0 à 0,7 tonne équivalent carbone, selon que ce régime autorise encore le poisson - sur lequel nous compenserions sûrement ! - et donc les crevettes, qui sont probablement le produit de la mer le plus "riche en gaz à effet de serre", ou aucun produit animal autre que le fromage).

➤ Manger bio va dans le bon sens du point de vue des émissions, mais il faudrait faire un calcul (que je n'ai pas fait) pour démêler quelques effets contraires et savoir quel est le bénéfice exact :

➤ l'absence de recours aux engrais de synthèse azotés supprime les [émissions de N₂O des cultures](#) et l'énergie - donc les émissions - de l'industrie chimique pour la fabrication des engrais ; à rendements constants c'est près de 50% de baisse que nous aurions,

➤ mais puisqu'on ne fertilise plus autant, les rendements à l'hectare sont en général inférieurs (les rendements de l'agriculture intensive ne sont pas "durables" du tout, car ils sont permis par des hydrocarbures abondants), or le trajet du tracteur dépend de la surface cultivée et non de la quantité de choses qui pousse. De ce fait la "quantité d'énergie du tracteur par tonne obtenue" augmente, mais pas au point de contrebalancer l'effet de l'alinéa précédent.

➤ enfin il faut bien sur que le produit bio ne vienne pas par avion de l'autre côté de la planète (ce que j'ai vu à plusieurs reprises) : le remède est alors pire que le mal !

Que pourrions nous au contraire faire pour augmenter nos émissions ?

➤ manger un steak de 500 g par personne et par jour (rien que cela permettrait de faire grimper ce poste de quelques tonnes équivalent carbone !),

➤ manger un repas sur deux des surgelés Picard ou des plats tout prêts achetés en grande surface. Une incidente : beaucoup de gens m'expliquent que les grandes surfaces sont "plus économiques" que les petits commerces ou le marché. Globalement, c'est bien évidemment faux : si ce type de commerce permettait de dépenser toujours moins, cela ferait entrer l'économie en récession

perpétuelle ! Même si le coût unitaire de chaque produit diminue (et encore, comparer n'a pas toujours un sens : ce ne sont pas les mêmes poulets que l'on achète en supermarché et directement chez un petit éleveur au marché), le montant global d'un caddie augmente sans cesse. Simplement ce dernier est rempli de choses "accessoires" que l'on ne trouve pas au marché mais dont l'utilité se discute : produits non alimentaires achetés "en passant" mais sans lesquels nous vivions très heureux avant de les avoir achetés, produits alimentaires à l'intérêt controversé (boissons sucrées, zinzins à apéritif, chips, etc). Les grandes surfaces proposent aussi des aliments bien plus chers que si nous les préparons nous mêmes (le prix au kg des plats tout prêts ou des surgelés incorpore notamment la main d'oeuvre de l'agroalimentaire et le coût des transports intermédiaires, donc est nécessairement supérieur à l'équivalent préparé à la maison. Si c'est moins cher en apparence, c'est que les ingrédients ne sont pas les mêmes !).

Achats de produits manufacturés

L'essentiel de nos achats de produits manufacturés concerne :

- le remplacement occasionnel de l'électroménager, mais les émissions de fabrication de ces appareils sont marginales devant les émissions liées au fonctionnement,
- un ordinateur tous les 2 ou 3 ans en ce qui concerne mon travail (par obligation plus que par plaisir) avec une émission correspondante de l'ordre de 100 kg équ. carbone par achat (je n'ai jamais eu l'occasion de calculer en détail),
- quelques vêtements, CD, jouets à Noël... Mon expérience est que comparées aux émissions de chauffage et de transport les quantités en cause sont secondaires si la consommation de tels produits reste modeste (et objectivement nous n'achetons pas un pantalon par jour !). Disons que nous rajouterons 15% au total pour tenir compte de tous ces achats, dépenses d'entretien de la maison comprise.

Poubelles

Même si nous essayons de faire en sorte de ne pas trop jeter (notamment en évitant d'acheter des produits avec des emballages empilés l'un sur l'autre quand nous pouvons acheter les mêmes sans), nous avons bien évidemment des choses dans notre poubelle. Sans l'avoir pesée précisément, je pense qu'elle contient au maximum 20 kg de déchets par semaine soit, en supposant que sa composition soit "standard", une émission correspondante d'environ 400 kg équivalent carbone ([voir détails](#)).

Loisirs

Quand nous partons en vacances, nous louons des endroits où dormir. Ces lieux, que ce soit un gîte rural ou un bateau à voile, il a fallu les construire, et cela engendre des émissions, et l'hiver il faut les chauffer, ce qui engendre aussi des émissions. En faisant un petit *prorata temporis*, les émissions de ce poste sont estimées à 20% du poste "chauffage" de notre maison, soit 400 kg équivalent carbone au total.

Qu'avons nous déjà fait pour faire baisser ces émissions ?

➤ nous ne voyageons jamais loin, et [jamais par avion](#)

Quelles sont nos marges de manoeuvre restantes ?

➤ elles sont en fait incluses dans les autres postes. Par exemple nous pourrions pratiquer des activités qui ne nécessitent aucune conduite de voiture (faire la voile sans aller - en voiture, hélas, vu le barda à trimballer - jusqu'à la côte est difficile !),

Que pourrions nous au contraire faire pour augmenter nos émissions ?

➤ prendre l'avion à chaque vacances (là nous pouvons doubler le total de la maisonnée assez facilement)

➤plus marginalement, jouer au golf ou pratiquer un "sport" motorisé....

Total

Si l'on excepte quelques contributions diverses supplémentaires auxquelles je pense (adduction d'eau, qui consomme de l'énergie ; traitement des eaux usées, qui en consomme aussi ; achats de services récurrents tels téléphone ou assurance, ou non récurrents tels que plomberie ou peinture de temps à autre, etc) ou auxquelles je ne pense pas, ma maisonnée engendre donc les émissions suivantes :

Poste	Emissions annuelles en kg équivalent carbone
Chauffage/eau chaude	2.100
Energie pour le travail	0
Transports	1.100
Alimentation	1.300
Loisirs (hébergement seul)	400
Déchets	400
Total avant achats	5.300
Achats de produits manufacturés	700 (1)
Total (année de référence 2001/2002)	6.000

(1) ce montant correspond à peu près à un achat total de l'ordre de 500 kg de produits par an.

Comme nous sommes 6 personnes à habiter dans notre maison, il est assez facile d'en déduire que nous avons une émission par tête égale à une tonne équivalent carbone.

Cela représente à peu près la [moitié de l'émission moyenne par Français](#) (tous [gaz à effet de serre](#) confondus). Cette modestie apparente doit un peu à toutes les raisons mentionnées ci-dessus dans les chapitres "Qu'avons nous déjà fait pour faire baisser ces émissions ?", mais aussi à l'absence de comptabilisation des services publics, et largement au fait que certaines émissions ne sont généralement pas ajustées à la baisse quand la taille de la famille diminue. Par exemple, si nous conservons la même maison une fois les enfants partis, nous augmenterons mécaniquement les émissions de chauffage par tête d'autant, et le même raisonnement s'applique au véhicule familial.

Cet exemple illustre cependant que l'on peut déjà, au prix de quelques efforts ni très coûteux ni très contraignants, être un peu plus sobre que la moyenne, et je n'ai ni l'impression de vivre comme un moine, ni celle d'être malheureux comme les pierres ! Il n'en reste pas moins que chaque membre de Janco & co est encore [deux fois trop émetteur si l'objectif est d'arrêter d'enrichir l'atmosphère en gaz à effet de serre](#) : y parvenir ne sera pas trivial, et boudier les marges de manoeuvre "faciles" (telles [le nucléaire](#)) rendra encore plus ardu le recours aux marges de manoeuvre "difficiles" (mais souhaitables) : les économies d'énergie résultant d'une baisse de la consommation matérielle et les [énergies renouvelables](#).

Ne suffit-il pas d'attendre d'avoir moins d'énergie fossile ?

dernière version : janvier 2008

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

On peut légitimement se demander si, pour lutter contre le changement climatique, il ne suffit pas d'attendre que nous ayons de moins en moins de combustibles fossiles, ce qui provoquera par contre-coup la baisse de nos émissions. C'est tellement simple qu'il suffisait d'y penser, ou vous me la referez celle-là tellement c'est idiot ? En fait, ici comme ailleurs ce sont les chiffres et ordres de grandeur qui vont nous servir de juge de paix.

Dans un monde **dans lequel la consommation de combustibles fossiles deviendrait tout d'un coup constante** (ce qui n'a bien sûr jamais été le cas), nous disposerions :

- de pétrole conventionnel pour environ 40 ans en nous limitant aux réserves prouvées, sachant que les réserves prouvées ne représentent qu'une partie [du pétrole qui sera extractible un jour](#) (et surtout la consommation n'est pas constante, mais on y revient plus bas !),
- d'une quantité à peu près équivalent de pétrole "non conventionnel" : [sables asphaltiques, offshore profond](#) (mais ne sont pas mobilisables aussi vite),
- de gaz pour environ 60 ans (les estimations varient de 65 à 100 ans),
- de charbon pour 2 siècles.

En plus de tout cela, il existe une quantité significative de méthane (le principal constituant du gaz naturel) présent dans les premières centaines de mètres des sédiments océaniques (les [hydrates de méthane](#)), qui font toujours l'objet d'une intense discussion pour savoir si ils seraient exploitables "un jour" ou pas.

Présentées sous cette forme, les informations nous laissent penser que si nous ne "faisons rien", nous n'aurons pas de contraintes involontaires sur les émissions (à cause du manque de ressources) avant quelques siècles (merci le charbon). En fait, nous allons voir que ce n'est pas comme cela qu'il faut raisonner.

Un peu de prospective

Le haut de la fourchette des réserves mondiales ultimes de combustibles fossiles représentent, fin 2005, de l'ordre de 4.000 Gtep (4000 milliards de tonnes-équivalent pétrole), réparties comme suit :

- à peu près 800 Gtep de réserves dites prouvées (voir [explications sur cette page](#))

Type de ressource	Gtep en ressources prouvées	Années à consommation
-------------------	-----------------------------	-----------------------

		constante (2005)
Charbon et lignite)	460	160
Pétrole	160	43
Pétrole non conventionnel	80	-
Gaz naturel	160	65
Total	860	95

➤ au plus 3.000 Gtep de réserves dites "additionnelles". Ces réserves viennent en plus des réserves prouvées et se composent de la fraction extractible de tous les hydrocarbures qui sont contenus dans les réservoirs restant à découvrir, ainsi que dans les réservoirs déjà découverts et mis en exploitation quand la technique aura progressé, ou quand il y aura une "bonne surprise" sur la taille du réservoir, la porosité, la fluidité de l'huile, etc (voir [page sur la définition des réserves](#)). En gros c'est la fraction qui finira par être extractible des "ressources en terre" connues ou supposées avec une probabilité d'existence supérieure à 50%,

Type de ressource	Gtep en réserves additionnelles (haut de fourchette)
Charbon et lignite	2 540
Pétrole et gaz conventionnels	300
Pétrole non conventionnel	120
Total	2 950

Comme nous l'avons fait ci-dessus, il est usuel de présenter les réserves en années de consommation constante. Aujourd'hui le monde entier consomme de l'ordre de 10 Gtep d'énergie fossile par an, et donc bien des gens considèrent que des ressources ultimes restantes de 4.000 Gtep permettent encore 4 siècles de consommation d'énergie fossile, sans prise en compte des problèmes liés au CO₂ dégagé par ces ressources. C'est simplement oublier... que la consommation d'énergie fossile [croît sans cesse](#), et qu'en plus un "haut de fourchette" pour les réserves ultimes n'est [pas équivalent à des hydrocarbures accessibles de manière certaine](#).

Nous allons maintenant faire l'exercice en supposant que la croissance actuelle de la consommation de combustibles fossiles se prolonge à l'avenir. Nous allons supposer en outre que chaque type de combustible fossile peut se substituer à un autre, ce qui est "chimiquement" parfaitement exact :

➤ Depuis les années 1920, il est possible de faire des hydrocarbures liquides de synthèse à partir de charbon (c'est le procédé Fisher-Tropsch), pour remplacer le pétrole (seul inconvénient, ça fait du CO₂ en pagaille, mais ici nous allons ignorer cet aspect),

➤ Il est tout aussi possible de faire de la chimie organique à partir de charbon,

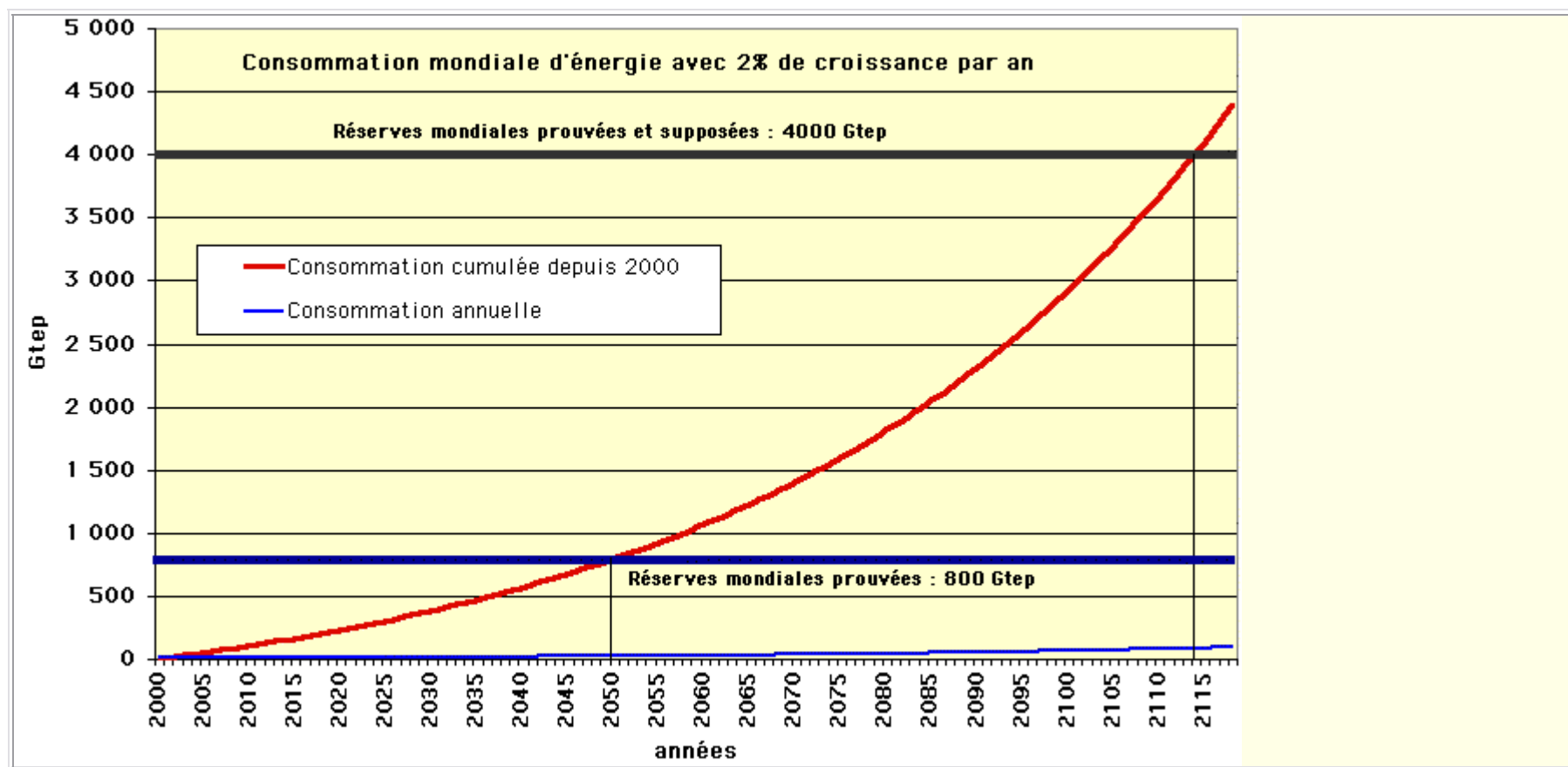
➤ Il est tout possible de faire de la chaleur industrielle ou pour les réseaux de chauffage urbain avec un des hydrocarbures de manière indifférente,

➤ Il est encore parfaitement possible d'utiliser indifféremment gaz, charbon ou pétrole pour la production électrique (qui, dans le monde, est actuellement faite avec du charbon pour 40%, du gaz pour 20%, devant le nucléaire avec 15% et l'hydroélectricité avec 15% aussi, le solde étant le fait du fioul lourd et, [de manière complètement marginale, des éoliennes ou des panneaux solaires](#)),

Il n'est donc pas si infondée que cela de supposer que tous les hydrocarbures solides, liquides ou gazeux peuvent être amalgamés en un seul grand ensemble dans lequel nous piochons de manière croissante tant qu'il y en a. Si nous supposons en plus que nous avons une croissance annuelle de la consommation d'énergie fossile de 2% par an (ce qui s'observe actuellement, en gros), en combien de temps avons nous vidé nos tiroirs ?

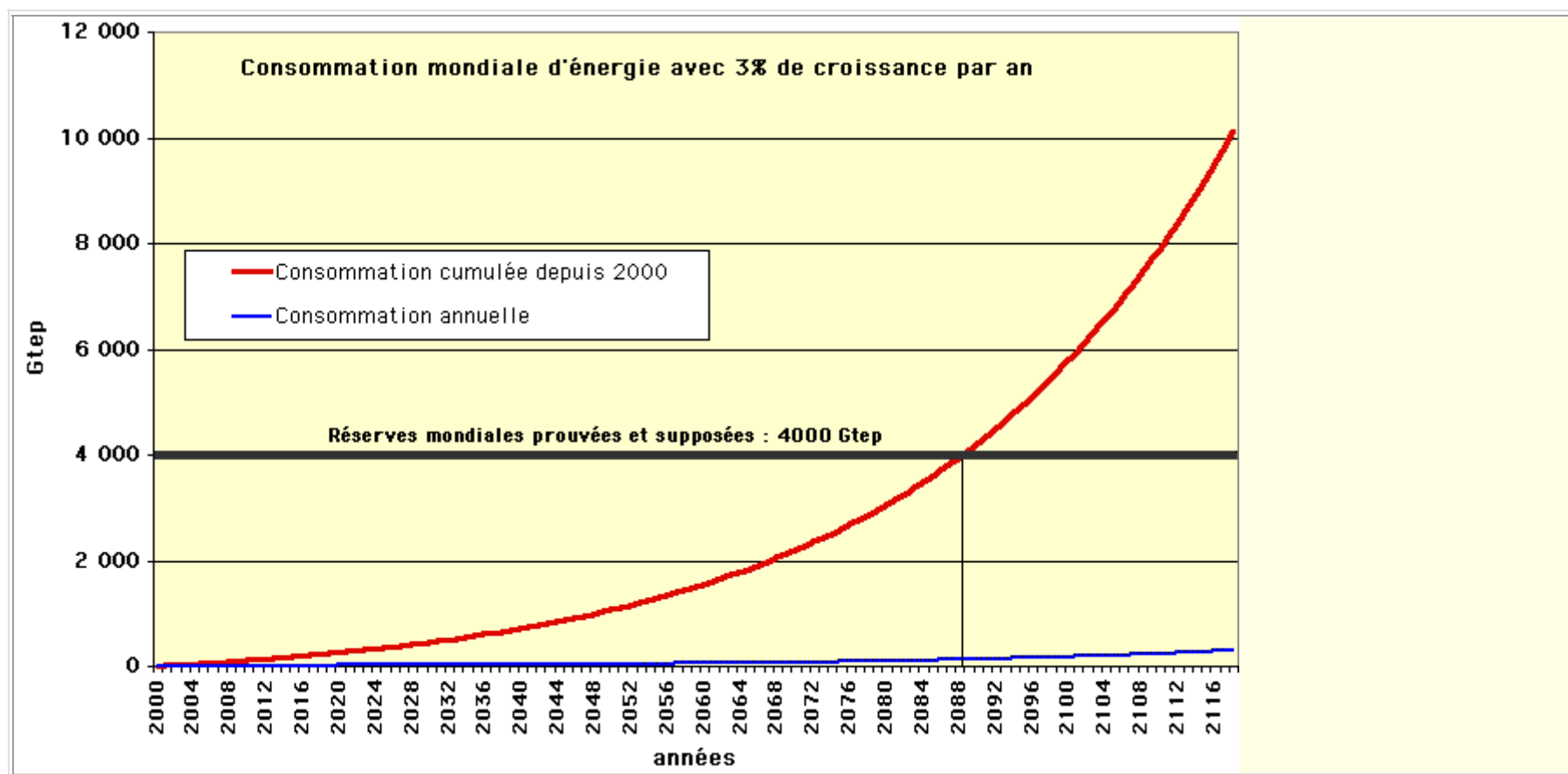
➤ **en 50 ans** (au lieu de 100 sans croissance) **pour consommer toutes les réserves prouvées** de pétrole, gaz, et tous types de charbons,

➤ **en 115 ans** (au lieu de 400 sans tenir compte de la croissance) **pour consommer toutes les réserves prouvées et additionnelles supposées** de pétrole, gaz, et tous types de charbons ; cf. ci-dessous.



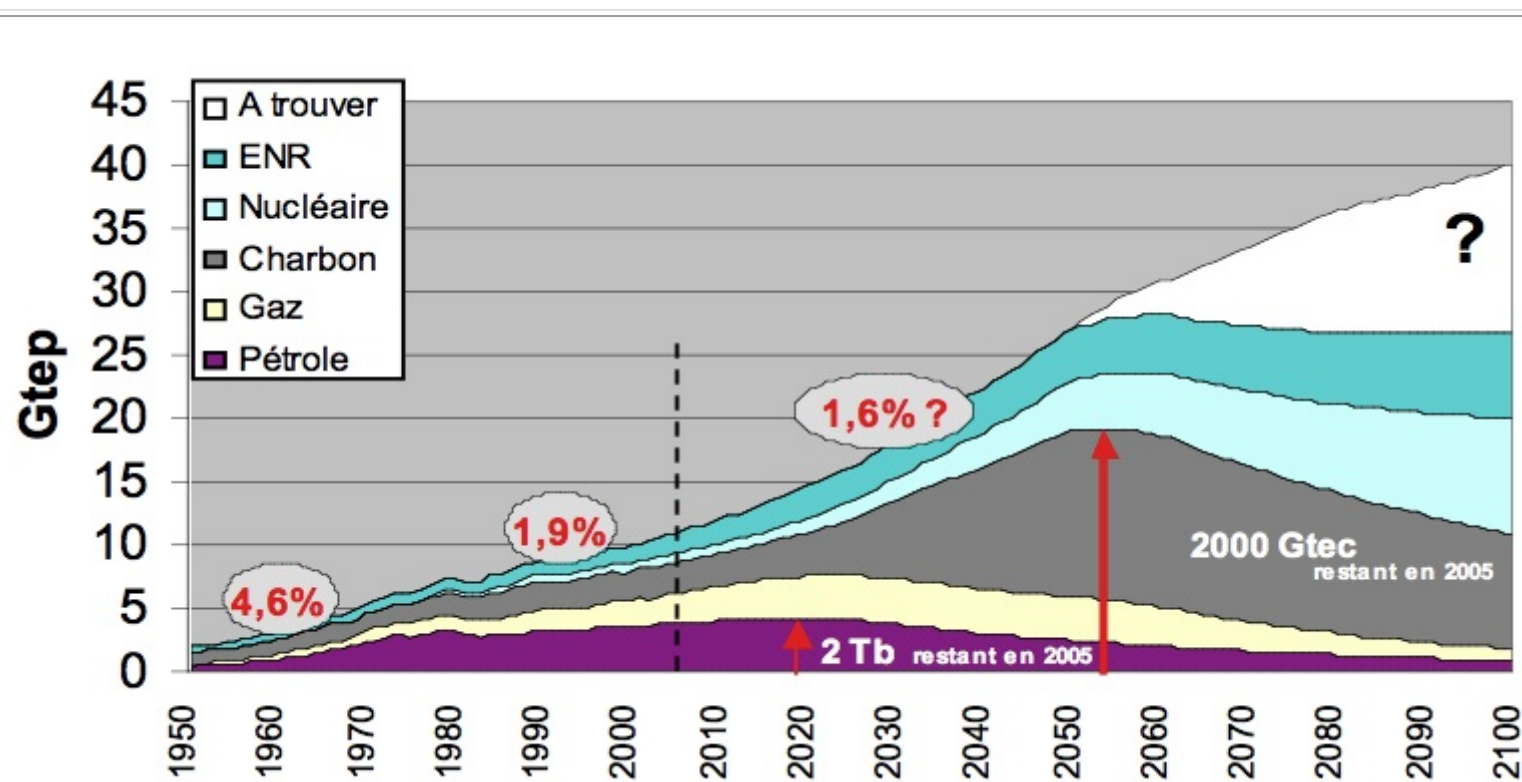
Tant que le toujours plus reste l'objectif de tout le monde, et que cela "passe" physiquement, ne pas perpétuer une telle croissance est difficile à éviter. Rions un peu : en théorie, appliquer à 9 milliards d'individus (ordre de grandeur de la population de la 2^e moitié du 21^e siècle en prolongation tendancielle) la consommation d'un américain "moyen" d'aujourd'hui (7 tonnes équivalent pétrole par an) amènerait une consommation de 63 Gtep par an, niveau qui serait atteint en 2100. En fait cela n'arrivera jamais (voir plus bas), mais cela donne un ordre de grandeur intéressant quand on parle d'étendre le mode de vie des pays "développés" à l'ensemble de la planète : une chose est sûre, le niveau de convergence ne peut en aucun cas se faire au niveau de l'américain actuel ! (ni même de l'européen actuel).

Si nous supposons maintenant une croissance annuelle de 3% de cette consommation d'énergie, c'est-à-dire plus près de l'augmentation de la consommation mondiale toutes énergies confondues depuis la dernière guerre mondiale, ces durées passent respectivement à 43 ans (moment où la courbe "cumulée" atteint la valeur 800) et 90 ans (moment où la courbe "cumulée" atteint la valeur 4.000 ; ci-dessous).



Les 63 Gtep par an seraient atteints en 2066 seulement, sauf que... nous n'y arriverons pas, parce qu'il n'existe pas de consommation qui soit maximale le jour J et nulle le lendemain matin (sauf météorite anéantissant toute l'humanité en quelques

secondes). En effet, pour les hydrocarbures dans leur ensemble [comme pour le pétrole](#), nous aurons un "pic" de consommation suivi d'une décroissance de l'offre, parce que cette consommation prélève dans [un stock fini aux échelles de temps qui nous intéressent](#) (incidemment cette conclusion d'un maximum est applicable à toute production issue d'un stock non renouvelable, ce qui concerne aussi tout minerai métallique).



Evolution de la consommation énergétique mondiale avec des réserves de charbon plutôt dans le haut de la fourchette, et une demande soutenue "tant que ça passe". Malgré un développement "fort" des renouvelables et du nucléaire dans ce scénario le report du pétrole sur le charbon ne fait pas gagner 2 siècles de croissance de la consommation d'énergie, mais "juste" une génération, et ce au prix d'une addition climatique sur laquelle nous allons dissenter plus bas, mais qui sera très certainement

ingérable pour ceux à qui nous allons la confier.

Source du graphique : EDF R&D, Revue de l'énergie, avril 2007

La conclusion de ce qui figure plus haut est donc assez simple : nous aurons très vraisemblablement droit au pic de la consommation mondiale d'énergies fossiles "quelque part" entre 2010 et 2060. Mais est-ce que cela fait une différence au niveau du climat ? La réponse est bien sûr que oui, ce qu'illustre le tableau ci-dessous.

Période de survenance du maximum des émissions de CO2	Concentration atmosphérique en CO2 au moment de la stabilisation	Concentration atmosphérique tous gaz à effet de serre au moment de la stabilisation en CO2-équivalent	Augmentation de température globale à l'équilibre, par rapport à la température de 1850
2000 à 2015	350 à 400 ppm	445 à 490 ppm	2,0 à 2,4 °C
2000 à 2020	400 à 440 ppm	490 à 535 ppm	2,4 à 2,8 °C
2010 à 2030	440 à 485 ppm	535 à 590 ppm	2,8 à 3,2 °C
2020 à 2060	485 à 570 ppm	590 à 710 ppm	3,2 à 4,0 °C
2050 à 2080	570 à 660 ppm	710 à 855 ppm	4,0 à 4,9 °C
2060 à 2090	660 à 790 ppm	855 à 1130 ppm	4,9 à 6,1 °C

Les différentes colonnes de ce tableau représentent respectivement :

- la période à laquelle les émissions de CO2 passent par un maximum (étant entendu qu'avant le maximum des émissions ces dernières sont toujours en croissance, par définition, et donc que plus le "pic" est tardif, et plus les émissions seront monté haut, et plus nous aurons tapé dans le charbon),
- la concentration atmosphérique en CO2 au moment où cette dernière cesse d'augmenter (se stabilise), ce qui surviendra quelques décennies à quelques siècles après le maximum des émissions (ce n'est pas au moment où les émissions passent par leur maximum que la concentration se stabilise, mais [au moment où les émissions sont redescendues sous la moitié des émissions de 1990](#)),

- la concentration atmosphérique tous gaz à effet de serre confondus au moment où la situation se stabilise, avec les mêmes hypothèses que pour la colonne précédente,
- l'élévation de température planétaire au moment où la situation se stabilise de ce point de vue, sachant qu'[un délai de quelques décennies à quelques siècles sépare la stabilisation de la concentration en gaz à effet de serre de la stabilisation des températures](#), et que ce qui figure ci-dessus ne prend pas en compte un [franchissement de seuil sur le cycle du carbone](#) (ou sur autre chose, l'actualité récente abondant en mauvaises nouvelles, comme par exemple [sur le Groenland](#) ou [l'acidification de l'océan](#)).

Source : GIEC, résumé pour décideurs du rapport d'évaluation du groupe 3, 2007

Ce que dit le tableau ci-dessus, en clair, est que le prix à payer pour 30 ans de croissance supplémentaire de l'énergie fossile (avec un pic qui passe de 2020 - pétrole seul - à 2050 - tous hydrocarbures, en chiffres ronds) est un doublement de l'élévation de température atteinte à terme, et peut-être plus si des mécanismes amplificateurs se révèlent être plus "sensibles" que ce qui est actuellement envisagé (c'est un risque majeur à l'échelle de quelques décennies [pour le cycle du carbone](#), un risque non négligeable "plus tard" pour les [hydrates de méthane](#), un risque non négligeable à l'échelle du siècle pour l'absorption de l'océan, etc).

Or la différence entre 2°C et 4 ou 5 °C est colossale. La première peut éventuellement rester gérable, même si elle aura déjà des impacts majeurs sur la biodiversité et les [écosystèmes](#), [l'agriculture](#), la [santé](#) (via la prolifération des germes bien plus que via l'impact direct des canicules). Rappelons nous que 5°C, c'est "juste" [ce qui nous sépare d'une glaciation](#). Ce que montrent les calculs de coin de table ci-dessus, c'est donc que si nous attendons la raréfaction des hydrocarbures pour faire baisser les émissions de CO₂, nous n'allons pas avoir un problème qui en aura évacué un autre, mais nous allons cumuler deux problèmes en même temps. Nous aurons les inconvénients de la pénurie et les [troubles sociaux attachés](#), ET les des dégâts climatiques majeurs un peu plus tard, puisque le [paroxysme du changement climatique est postérieur au maximum des émissions](#) de quelques décennies à quelques millénaires.

Et pour ne pas avoir ce scénario catastrophe, il faut que les émissions de CO₂ se mettent à baisser dès 2020 au plus tard. En pareil cas, le carbone que nous pouvons encore mettre dans l'atmosphère **représente un tout petit peu moins que les réserves prouvées conjuguées de gaz et de pétrole**. Eviter le grand saut dans l'inconnu climatique peut donc se résumer à "ne pas

toucher au charbon quand nous aurons moins de pétrole". De ce fait, nous sommes d'une certaine manière pile dans la mauvaise situation :

- il reste assez d'hydrocarbures et de charbon pour nous permettre d'émettre de plus en plus de CO₂ pendant une large fraction du siècle à venir,
- plus nous repoussons l'échéance en ce qui concerne la baisse de la consommation d'hydrocarbures et plus nous risquons de fortes concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et donc un dérèglement majeur du climat ensuite,
- mais il ne reste pas assez de combustibles fossiles pour être sûr que nous aurons à notre disposition l'énergie nécessaire pour parer aux éventuelles catastrophes dans quelques dizaines d'années (par exemple reconstruire de quoi nourrir et loger quelques milliard d'hommes si il faut migrer de manière massive), et encore moins pour compter dessus pour alimenter une croissance économique ininterrompue pour le siècle à venir.

Ne faut-il pas attendre d'être absolument certain du phénomène avant d'agir ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Compte tenu de ce que cela pourrait signifier de se passer de pétrole, de charbon et de gaz, beaucoup de responsables politiques ou d'entreprise sont tentés de se dire qu'il vaut mieux être certains - donc attendre - avant de faire quelque chose. C e pari s'apparente très exactement, en termes de démarche, au jeu de la roulette russe.

Qu'est-ce qui caractérise un climat ?

Un climat se définit par des valeurs moyennes observées sur une durée longue (30 ans).

C'est pour cela qu'à la question favorite des journalistes "est-on en train d'assister à un changement climatique", posée désormais à chaque tempête,

en France ou ailleurs, les [scientifiques concernés](#) répondent invariablement : il est trop tôt pour le dire.

Ils ne peuvent dire autre chose : nous saurons dans 30 ans si le climat a changé en 2000 !

Mais attendre jusqu'en 2030 est peut-être le [pari de Pacal à l'envers](#) (le pari perdant à tout coup).

En effet, au moment où l'on pourra constater, par la mesure physique, que le phénomène est explicite, nous serons alors très avancés - et de manière irréversible pour quelques siècles, à cause de la [durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère](#) - dans un phénomène comportant une inertie considérable et dont les [conséquences](#) sont imprévisibles.

Ne rien faire maintenant en attendant de nouvelles avancées de la science est donc d'ores et déjà prendre le pari qu'aucune catastrophe majeure ne surviendra à l'avenir.

C'est à l'évidence un pari terrible, et dont les gagnants ou perdants ne sont pas nécessairement nous-mêmes (encore qu'une mauvaise surprise soit possible à peu près à tout moment), mais **nos enfants ou petits enfants**, qui actuellement n'ont pas voix au chapitre, et ne pourront qu'assister impuissants, si un bouleversement gravissime survient, aux conséquences de nos actes actuels.

En outre personne ne peut savoir si [une région du monde sera épargnée](#). C'est donc aussi une responsabilité terrible envers nos proches descendants que de décider de ne rien faire maintenant.

Ce problème, [global et irréversible à l'échelle de quelques générations](#), est une novation pour notre espèce. Les problèmes "classiques" de pollution correspondent à une situation souvent assez largement réversible, ou, quand elle ne l'est pas, géographiquement circonscrite. En d'autres termes, le problème est soit global et réversible (cas de la couche d'ozone par exemple), soit irréversible mais souvent local (cas de la mer d'Aral par exemple). Dans le premier cas la solution est d'arrêter la dégradation avant qu'elle ne soit trop sévère puis de "renverser la vapeur". Dans le deuxième, on considère que ce qui est perdu est perdu, mais on fait en sorte de ne pas perdre plus.

Ici, il n'est pas possible, comme nous le faisons habituellement, de raisonner en termes de dangers avérés, que l'on évite une fois que l'on les voit. Il nous faut raisonner en termes de risques, qu'il faut éviter à tout prix, au sens premier du terme (ce qui rend tous les débats sur le "coût" de l'effet de serre un peu vain : ce phénomène a un coût d'évitement, [mais n'a pas de coût de réparation](#)).

Nous sommes par ailleurs familiers de la gestion du risque : c'est à cela que servent les assurances.

Prendre une assurance, cela consiste à se prémunir quand nous ne sommes pas capables de réparer seuls un dommage (reconstruire une maison brûlée par exemple) ou que nous cherchons à amortir le plus possible les conséquences d'un dommage (perte d'un revenu en cas de décès par exemple).

En matière d'effet de serre, la prime d'assurance est la [réduction rapide](#) des émissions de CO₂ (et des autres gaz à effet de serre). Elle coûterait peut-être un peu (encore que ce ne soit même pas certain : il y a des économistes pour dire que ce serait une bonne affaire pour l'emploi), mais nous prémunirait contre le risque de subir un phénomène dont nous ne savons rien de l'ampleur et qui serait de toute façon irréversible pour quelques siècles au moins.

A quel niveau faut-il stabiliser le CO₂ dans l'atmosphère ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Il n'y a pas de réponse scientifique formelle à cette question

En effet, dire que le niveau de gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère à ne pas dépasser est de tant (par exemple de 550 ppmv) supposerait que l'on puisse établir que, tant que nous restons en-dessous de ce niveau nous ne courons aucun risque majeur (et il reste à définir précisément ce qui distingue un risque mineur d'un risque majeur), et que dès que nous l'aurons dépassé nous connaîtrons une situation en comparaison de laquelle le jugement dernier est une aimable plaisanterie.

Or [rien de tel ne peut aujourd'hui s'énoncer à partir du dossier scientifique](#), pour les raisons suivantes :

➤ en dehors des indications qui nous sont fournies par [les modèles](#), nous n'avons **aucun moyen de savoir de manière précise ce qui se passe à l'échelle de quelques décennies quand la teneur de l'atmosphère en CO₂ dépasse rapidement 280 ppmv** (une ppmv = une partie par million, soit 0,0001% ; en 2002 nous sommes déjà à 370), et en particulier nous n'avons qu'une visibilité locale très réduite.

➤ à cause de la [très longue durée de résidence du gaz carbonique dans l'atmosphère](#), les effets ne sont pas instantanés : ce n'est pas le jour où nous passerons au-dessus d'un seuil que nous aurons les ennuis, mais éventuellement quelques décennies ou siècles plus tard, sans que nous ne puissions inverser le cours des événements.

Par contre il y a quand même deux choses qu'il est possible de faire : c'est de relier quelques événements donnés à des seuils grossiers à ne pas dépasser, d'une part, et de relier l'évolution des émissions à la concentration maximale d'autre part. Et, bien sûr, il est relativement facile d'accepter que plus la concentration en CO₂ montera haut et vite, plus la hausse des températures sera importante et rapide, et donc plus nous augmentons le risque d'avoir affaire à des [conséquences \(très\) désagréables](#) plus tard.

Commençons par quelques exemples de seuils :

➤ il semble vraisemblable que les coraux ne supportent pas plus de 1 à 2 °C d'augmentation permanente de la température des mers dans lesquelles ils vivent. L'observation montre que des élévations temporaires de température à ce niveau (par exemple pendant les événements El Nino) provoquent un blanchiment réversible, mais si cette élévation devient permanente le corail meurt. Eviter l'extinction d'une large partie des coraux requiert donc que la [température planétaire n'augmente pas de plus de 1 à 2°C à terme](#) (la température de l'eau de surface suit de très près celle de l'air, ce qui n'est pas vrai en allant plus profond). Or avec une stabilisation de la concentration à 450 ppmv c'est très exactement la fourchette de l'augmentation de température à laquelle il faut s'attendre au bout d'un siècle, et l'[élévation sera supérieure à terme](#), ce qui suggère que sauf mise en oeuvre d'une réduction massive dans les années qui viennent ces écosystèmes sont d'ores et déjà largement condamnés.

➤ des analyses indiquent qu'il est possible que la "calotte occidentale de l'Antarctique" (celle qui recouvre le "doigt" qui remonte vers la Terre de Feu, sous le cap Horn, ainsi qu'un peu de continent à la racine du doigt) ait fondu dans le passé avec une température planétaire plus élevée de 2 à 3°C seulement par rapport à l'actuelle. Avoir la certitude d'éviter cet événement (la fonte de cette calotte "occidentale") requiert donc de rester en-dessous de 2°C d'augmentation globale quelle que soit l'échéance,

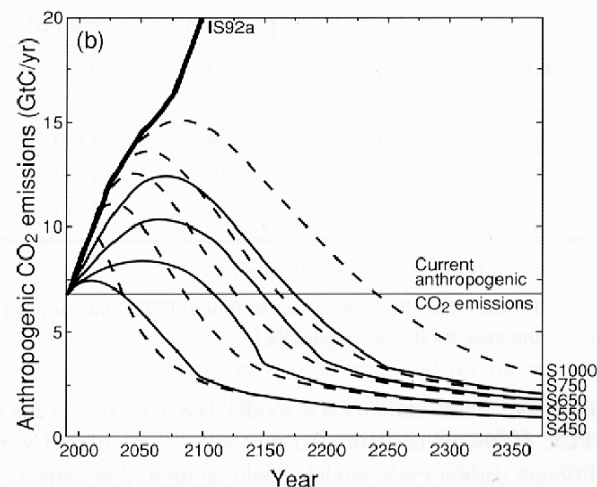
ce qui nécessite aussi de ne pas dépasser 450 ppmv à cause de l'[effet retard de l'augmentation de température par rapport à la concentration en CO₂](#). Rappelons que la fonte de cette partie de l'Antarctique, c'est 6 mètres d'eau en plus pour le niveau de la mer (les Bordelais, Nantais, Marseillais, Havrais, les Hollandais en totalité, quelques New-Yorkais et plus généralement tous les habitants du bord de mer auraient probablement quelques soucis à se faire), avec la possibilité de quelques raz de marée à l'occasion si une partie de la débâcle a lieu de manière soudaine.

➤ enfin l'[arrêt de la circulation océanique "verticale"](#) (dite thermohaline) pourrait se produire avec 3°C d'élévation de la température moyenne de la terre.

Sans que nous ayons une excellente visibilité, il existe donc quand même quelques ordres de grandeur de concentrations à ne pas dépasser pour éviter quelques événements pour lesquels la seule température est un déterminant direct. Il est beaucoup plus difficile de relier des événements pour lesquels la température - et sa distribution à la surface du globe - est un déterminant indirect : force maximale des ouragans, niveau maximal de précipitations ou durée maximale des sécheresses, etc.

Après cela, comment peut-on relier concentration maximale et émissions, afin de savoir quelle quantité de CO₂ nous aurons dans l'atmosphère selon la manière dont vont évoluer nos émissions ? Cela est en fait relativement aisé parce que le CO₂ est chimiquement inerte dans l'atmosphère : il ne s'élimine de l'air que par reprise par les "[puits](#)" (océans et biosphère continentale), et nous avons donc affaire à un banal problème de robinets. Le niveau de la baignoire (la concentration en CO₂ dans l'atmosphère) dépend uniquement des émissions et du niveau d'absorption des puits.

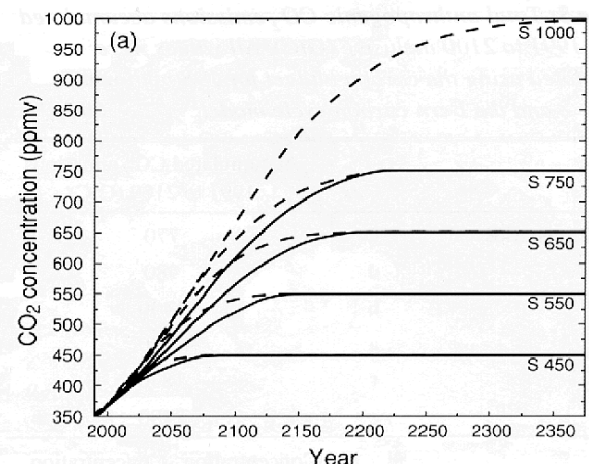
Pour un niveau donné d'absorption des puits, la valeur des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut donc se déduire de la courbe des émissions (graphiques ci-dessous).



Divers scénarios d'émission contenus dans le rapport d'évaluation du [GIEC](#) publié en 1996. L'axe vertical est gradué en milliards de tonnes équivalent carbone.

Les noms des diverses courbes correspondent à la concentration atmosphérique en CO₂ qui sera atteinte au moment de la stabilisation. Par exemple S750 signifie que si les émissions suivent le chemin décrit par la courbe, la concentration finira par se stabiliser à 750 ppmv (rappel : une ppmv = une partie par million, soit 0,0001%).

On peut voir que, quel que soit la valeur de la concentration en CO₂ au moment de la stabilisation, parvenir à cette dernière suppose que les émissions redescendent à un moment ou à un autre sous la moitié de ce qu'elles étaient en 1990, soit 2,5 à 3 Gt par an.



Evolutions correspondants de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, en ppmv. Chaque courbe ici se réfère à celle qui porte le même nom sur la figure de gauche.

Pour ceux qui aiment les maths, les courbes de cette figure correspondent à l'intégrale de la courbe portant le même nom sur la figure de gauche, moins l'intégrale de la fonction d'absorption des puits, laquelle, en première approximation, est constante et vaut 3 Gt/an (en fait elle varie un peu avec le niveau de la concentration atmosphérique, mais reste aux alentours de quelques Gt équivalent carbone/an, alors que les émissions pourraient monter bien plus haut).

Source : [GIEC](#), 1996

Ces courbes se lisent de la manière suivante : pour une concentration en CO₂ qui se stabilise à un niveau donné (figure de droite), on a calculé des exemples de courbes d'émission qui y correspondent (figure de gauche). La correspondance entre figures se fait sur les références de courbe (S450, S550, etc). Le point origine représente les émissions de 1990. Le trait gras (IS92a) correspond au "scénario catastrophe" où les émissions ne baissent pas pendant le 21^è siècle.

Il y a une conclusion importante, si ce n'est essentielle :

➤ **stabiliser la concentration de gaz carbonique dans l'air suppose, quel que soit le niveau de cette stabilisation, que les émissions mondiales de ce gaz redescendent "un jour" sous la moitié des émissions de 1990, puis encore en-dessous après,**

➤ pour que la concentration de CO₂ dans l'atmosphère se stabilise "seulement" à 450 ppmv (S450), niveau au-delà duquel des gros ennuis semblent probables dans un futur plus ou moins lointain (mais personne ne peut dire qu'en dessous nous n'en n'aurons pas aussi !), il faut enclencher la décroissance des émissions dès 2010-2020 pour les ramener en 2100 à un gros tiers des émissions actuelles.

➤ plus nous attendons pour réduire les émissions, et plus la stabilisation se fera à un niveau élevé.

La seule chose que l'on puisse dire, lorsque l'on regarde ces courbes, est que la rapidité du démarrage des réductions a un impact très significatif sur le niveau de stabilisation à terme, et que donc le plus de réduction le plus tôt sera le mieux. Dans cet esprit, si Kyoto n'est pas un objectif ultime, il a le mérite de tenter de mettre en mouvement la décroissance des pays industrialisés, sans garantir toutefois une baisse globale des émissions.

Cette baisse globale est cependant assez peu probable tant que nous considérons comme légitime que les pays dits "en voie de développement" se rapprochent le plus possible de notre niveau de consommation matérielle, qui va assez inexorablement avec notre niveau d'émissions de gaz à effet de serre, et que les réserves de combustibles fossiles le permettent.

Baisser les émissions sera de toute façon une réorientation conséquente

Nous avons vu que les consommations énergétiques ont tendance à augmenter. Est-ce cela signifie nécessairement que nous ne pouvons rien faire contre les augmentations des émissions de CO₂ ? Non, car nous disposons de sources d'[énergie sans CO₂](#), et nous savons comment réduire vite les émissions des [autres gaz à effet de serre](#). Et, comme le monde est fini, les émissions finiront par décroître "un jour".

Mais par contre il ne se passera rien sous forme volontaire et organisée **si l'objectif de réduction ne devient pas un objectif explicite et prioritaire**.

➤Explicité : cela veut dire qu'il est toujours dans la liste des points pris en compte dans toute décision collective (construction - ou absence de ! - d'infrastructure, fiscalité énergétique ou agricole, avantages octroyés à tel ou tel secteur d'activité, etc). Cela veut dire que cet objectif ne fait pas partie des non-dits, des choses que "on verra plus tard", et surtout que le citoyen le souhaite expressément et [force le politique à en tenir compte dans tout contexte](#) (mais cela signifie aussi que le citoyen [connait les contreparties](#) et les accepte).

➤Prioritaire : cela veut dire que si nous devons choisir entre une décision compatible avec la réduction des émissions et une décision qui ne l'est pas (par exemple souhaiter la modération des prix de l'énergie à court terme, ou encore l'[encouragement à la consommation matérielle de chacun d'entre nous](#)), sans possibilité de concilier les deux, il faut systématiquement [arbitrer en faveur de la réduction](#) (ce qui n'est quasiment jamais le cas aujourd'hui).

Sans que l'on puisse savoir si nous avons déjà perdu la partie ou pas, une chose est sûre : plus nous traînons et [plus nous-mêmes ou nos descendants prochent courons de risques](#). Le [GIEC](#) a estimé que [nos émissions dans quelques dizaines d'années pouvaient varier du tout au tout](#) en fonction de ce que nous allons faire.

Il se pose alors le problème de savoir [qui devrait réduire](#) et montrer l'exemple, et comment le faire. L'une des solutions pourrait être d'organiser un référendum mondial, ou [au moins européen](#).

Pour en savoir plus : [Effet de serre : les marges de manoeuvre](#), in La Jaune et La Rouge de mai 2000, par Benjamin Dessus, [Ecodev-CNRS](#) ;

Sous forme papier : "Dangerous climate impacts and the Kyoto protocol, Brian C. O'Neill & Michael Oppenheimer, Science, vol. 296, 1971-1972, 14 juin 2002

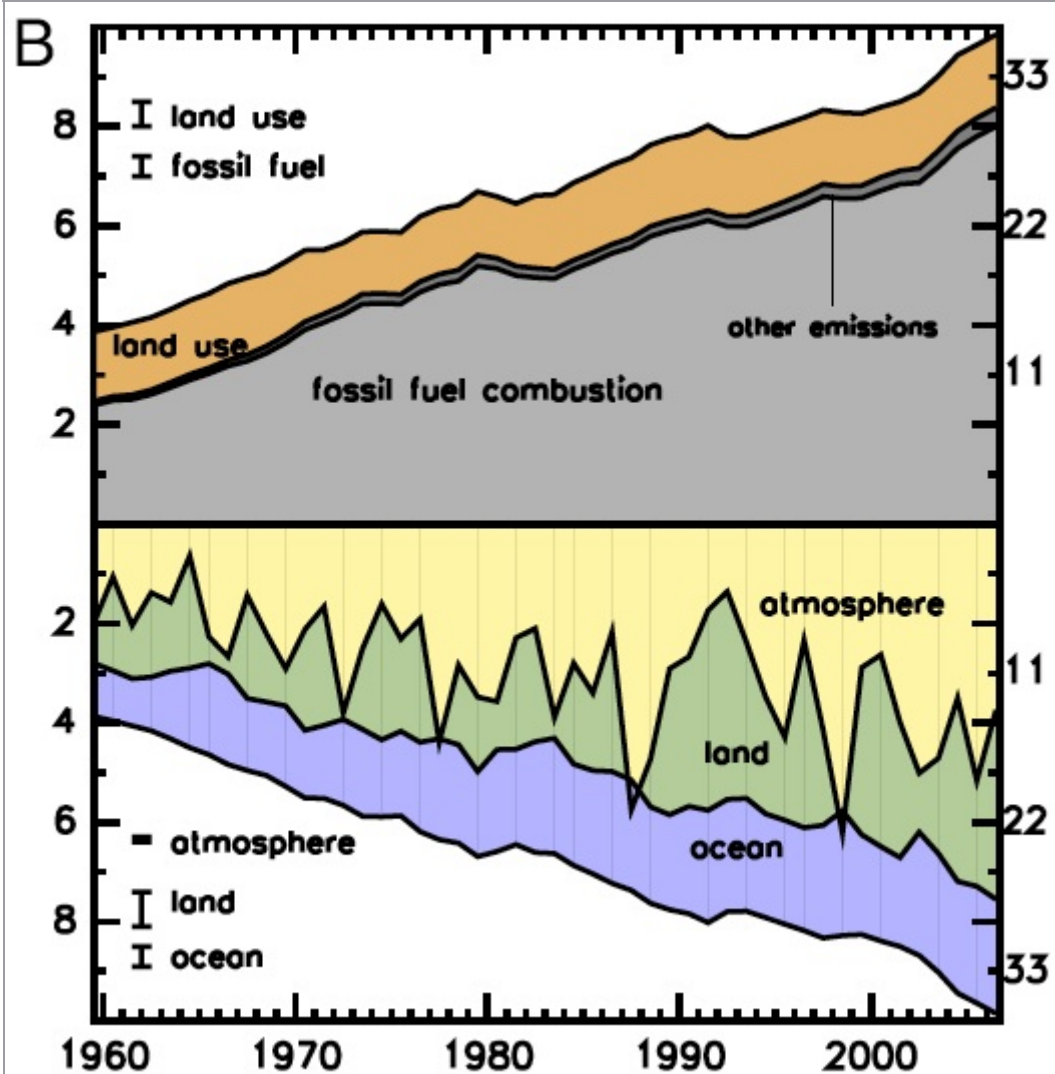
Que pouvons nous émettre comme CO₂ si nous voulons lutter efficacement contre le réchauffement climatique ?

octobre 2000 - révisé janvier 2008

source : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Le [GIEC](#) a publié dès 1996 la conclusion suivante : pour arrêter d'enrichir l'atmosphère en gaz carbonique (autrement dit pour que la quantité de CO₂ dans l'atmosphère soit stable et non croissante), quel que soit le niveau et quelle que soit la date à laquelle nous souhaitons y parvenir, [il faudra de toute façon que les émissions humaines de CO₂ soit divisées par deux au moins par rapport au niveau de 1990.](#)

Pourquoi faut-il opérer cette division par deux ? C'est presque de l'arithmétique toute bête : durant la décennie 1990, l'humanité émettait environ 6 milliards de tonnes de carbone par an dans l'atmosphère (soit 22 milliards de tonnes de CO₂), et "mère Nature" savait en récupérer environ 3 par an, grâce à ce qui s'appelle les "[puits](#)" (océans, écosystèmes terrestres). Dire que dame Nature ne parvient à retirer que 3 Gt de l'atmosphère par an, soit la moitié de nos émissions, c'est avoir dit que l'autre moitié vient augmenter la quantité de CO₂ dans l'atmosphère. En fait c'est un tout petit peu plus compliqué que cela, parce que les émissions ne sont pas constantes, et la fraction qui vioient enrichir l'atmosphère pas constante non plus (elle augmente).



Emissions de CO₂ (en milliards de tonnes) en fonction du temps (partie haute du graphique) et

"destinations" de ce CO₂ émis, en fonction du temps aussi (partie basse). On constate que depuis 1980 l'absorption de l'océan est à peu près constante en valeur absolue (environ 8 milliards de tonnes de CO₂ par an), et donc décroît en part relative. On constate aussi que l'absorption des écosystèmes terrestres est très variable d'une année sur l'autre, mais qu'en tendance lourde il y a de plus en plus de CO₂ qui reste dans l'atmosphère chaque année.

Source : Canadell et al, Proceedings of the National Academy Of Science (US), 2007.

Pour que la quantité de CO₂ dans l'atmosphère cesse d'augmenter, une première approximation consiste donc à dire qu'il faut diviser par 2 les émissions de 1990 (lesquelles émissions ont crû de 25% entre 1990 et 2004). En fait c'est un peu plus compliqué que cela - et l'objectif ultime est encore inférieur, hélas, comme l'encadré ci-dessous l'explique - car l'absorption des puits n'est pas constante quoi qu'il se passe par ailleurs, mais disons que de diviser les émissions mondiales par deux fixe les idées pour les décennies à venir.

Pour arrêter d'enrichir l'atmosphère en gaz carbonique (ou en tout autre gaz à effet de serre), le principe est très simple : il faut que les émissions humaines ne dépassent pas ce que les "puits de carbone" (océans pour une partie, écosystèmes continentaux pour le reste) savent absorber.

Mais cette absorption n'est pas constante. Actuellement, l'absorption en valeur absolue (c'est à dire en milliards de tonnes de carbone) :

- augmente avec la quantité de CO₂ dans l'air pour les puits continentaux : une atmosphère enrichie en CO₂ favorise, à court terme, la croissance des végétaux,
- augmente avec la quantité de CO₂ dans l'air pour l'océan : la quantité de CO₂ qui se dissout dans l'eau augmente si l'air est plus riche en CO₂ (les thermodynamiciens disent que la pression partielle de CO₂ de l'air et de l'eau s'équilibrent : si celle de l'air augmente, celle de l'eau augmente aussi),
- mais, tant pour les puits continentaux qu'océaniques, cette absorption diminuera à long terme avec la température : une eau plus chaude dissout moins bien le CO₂, et dans un climat plus chaud le surplus de croissance de la végétation (si il subsiste) compense de moins en moins une décomposition accélérée des végétaux morts et de l'humus du sol, qui

produit du CO₂. Comme la température est condamnée à augmenter à l'avenir, quoi que nous fassions (mais elle augmentera plus ou moins en fonction de ce que nous ferons, ce qui n'est pas une mince différence !) cela signifie aussi que les puits ont tendance à s'affaiblir avec le temps, même une fois que nos émissions sont stabilisées.

La conséquence de cette dernière caractéristique, c'est que diviser les émissions par 2 permettrait de se mettre au niveau **actuel** des puits, mais ensuite il faudra continuer à diminuer. Mais pour simplifier nous dirons que dans un premier temps l'objectif qui a un sens "physique" est de diviser les émissions mondiales de 1990 par 2, afin de fixer les idées, car nous sommes alors très très loin de Kyoto !

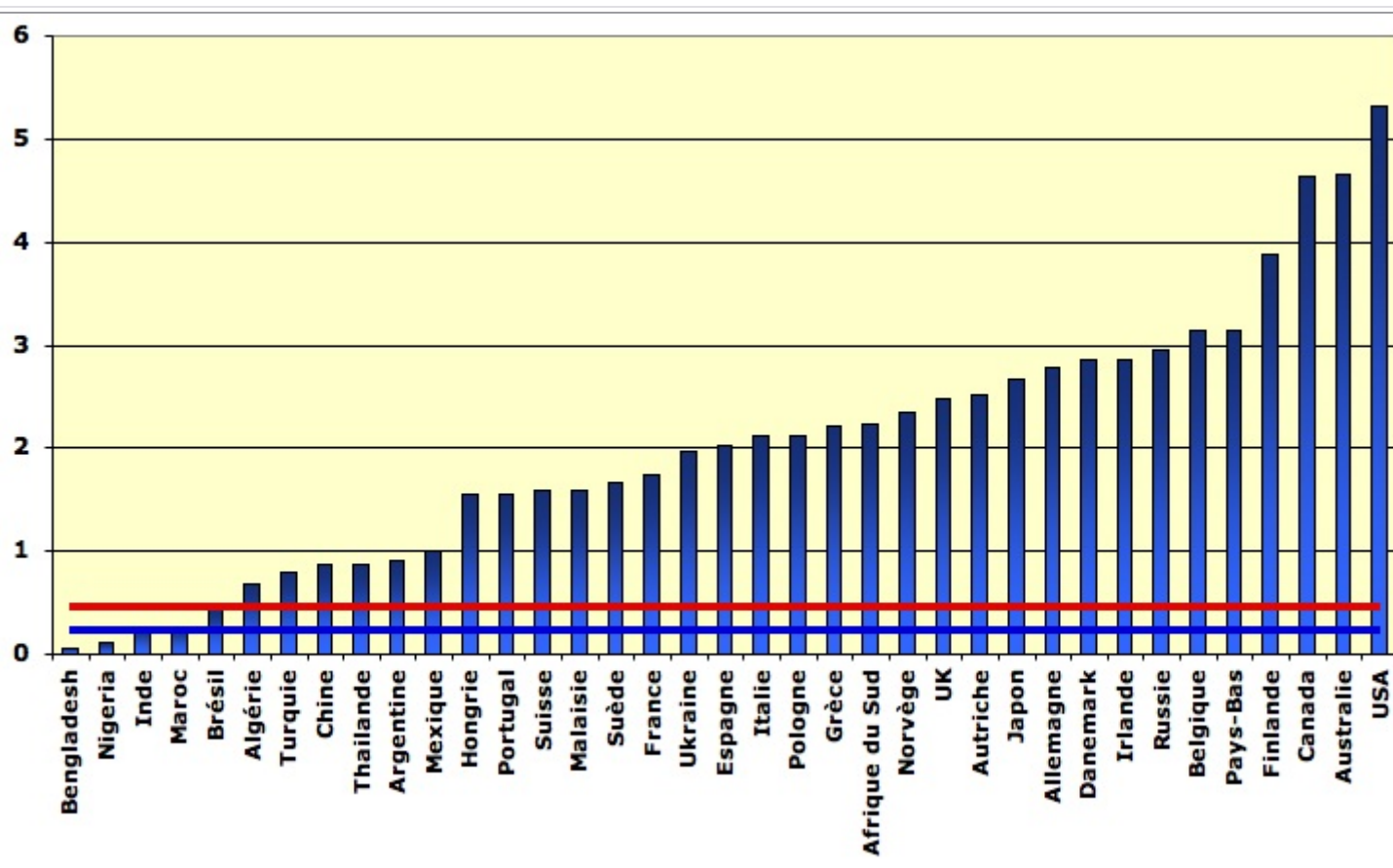
Attention : une atmosphère dont la concentration en gaz carbonique cesse d'augmenter, cela ne veut pas dire une diminution immédiate de l'effet de serre supplémentaire (par rapport à la situation préindustrielle, en 1750), et encore moins une diminution immédiate de la température. Cela veut juste dire que l'effet de serre supplémentaire arrête d'augmenter, mais l'atmosphère restera pendant des milliers d'années au moins avec un effet de serre plus important qu'en 1750. Pour limiter aussi vite que possible un changement futur, la division par deux de nos émissions est donc plus un minimum qu'un objectif suffisant.

Revenons aux chiffres : en 1990, nos émissions de gaz carbonique représentaient donc 6 milliards de tonnes équivalent carbone (encore notées 6 Gt). Indépendamment de ce qui a pu se décider à Kyoto, l'objectif mondial qui a un sens sur le plan physique est donc d'arriver à 3 Gt de carbone par an tout au plus (pour nos émissions de CO₂). 3 milliards de tonnes de carbone pour 6,5 milliards d'individus (en passe de devenir 7 à 9 d'ici à 2050), cela signifie, si nous répartissons équitablement le "droit à émettre", tout au plus **460 kg** de carbone par personne et par an, ou encore **1,7 tonne de CO₂** par personne et par an (en moyenne planétaire, donc).

Comme cette valeur de 460 kg de carbone ou 1,7 tonne de CO₂ ne dira probablement pas grand'chose à grand'monde, pour la rendre parlante il faut la comparer aux émissions "actuelles" - en l'espèce de 2004 - pour un certain nombre d'habitants de la planète. En effet, ce "quota équitable" de 460 kg de carbone par personne et par an représente :

➤ **moins de 10%** des émissions d'un Américain, d'un Australien ou d'un Canadien, qui devrait donc diviser ses émissions par 10 (voire 12) pour participer équitablement à l'effort de réduction mondial nécessaire,

- **Entre 15 et 20%** des émissions d'un Allemand ou d'un Danois (les Danois sont parmi les premiers émetteurs de gaz à effet de serre par habitant de la CEE !), qui devraient donc diviser leurs émissions par 6,
- **20%** des émissions d'un Anglais, qui devra donc diviser les siennes par 5,
- **25%** des émissions d'un Espagnol, où c'est une division par 4 qui les attend (le "rattrapage" économique de l'Espagne des 15 dernières années s'est accompagné d'une hausse de 40% des émissions par personne : encore une illustration du fait que [découpler croissance économique et CO2](#) ne va pas être une mince affaire, et que la croissance telle que nous la connaissons [ne durera pas](#), même si cette pensée est une sacrée "vérité qui dérange"....),
- **25% à 30%** des émissions d'un Français, d'un Suisse, ou d'un Suédois, où c'est une division par 4 - 3 pour ceux qui ne prennent pas l'avion, allez - qui permet de participer équitablement à l'effort de réduction mondial,
- environ 30% des émissions d'un Portugais, qui devra donc diviser ses émissions par 3,
- environ 45% des émissions d'un Mexicain, et seulement 50% de celles d'un Argentin ou d'un Chinois : **[aussi "pauvres" que ces habitants puissent être considérés](#), il sont déjà physiquement trop "riches" en ce qui concerne les émissions de CO₂,**
- Mais 1,5 fois les émissions d'un Indien ou 4 fois celles d'un Nigérian : quelques pays ont donc encore la possibilité d'émettre un peu plus.



Comparaison entre les émissions brutes de CO₂ par habitant en 1998 (CO₂ provenant des combustibles fossiles, en tonnes de carbone par an, sans les puits) et :

- la limite de 460 kg équivalent carbone par personne et par an, si l'objectif est de diviser les émissions mondiales de CO₂ par deux avec 6,5 milliards d'hommes sur terre (trait horizontal rouge)
- la limite si l'objectif est de diviser les émissions par trois, dans un monde où la population serait passée à 9 milliards

d'individus (trait horizontal bleu foncé).

Même les Chinois sont déjà au-dessus des deux limites, et pour résumer nous pouvons dire que le développement durable correspond aux émissions actuelles d'un Indien. Il saute aux yeux que l'économie "carbonée" n'est pas compatible avec la préservation du climat.

D'après UNFCCC, INED, CSE

Avec les technologies actuelles, la limite est vite arrivée, puisqu'il suffit, pour atteindre ce "droit maximal à émettre sans perturber le climat" (de 460 kg de carbone), de faire **une seule** des actions suivantes :

- faire un aller-retour de Paris à New York (en avion, pas en scaphandre autonome !),
- **OU** consommer 3.200 kWh d'électricité en Grande Bretagne (ou 3.000 kWh aux USA), mais 22.000 kWh en France (à cause du nucléaire mais chut, ce n'est pas politiquement correct...), sachant que la consommation annuelle par Français est de l'ordre de 6700 kWh actuellement (dont 50% nous est "invisible", parce qu'il s'agit d'électricité "contenue" dans les divers produits de l'industrie ou de l'agriculture que nous achèterons ensuite).
- **OU** acheter 50 à 500 kg de produits manufacturés (soit au plus le tiers d'une petite voiture, moins s'il y a beaucoup d'électronique ou de matériaux rares).
- **OU** acheter 1,5 micro-ordinateur à écran plat,
- **OU** utiliser 2 tonnes de ciment (une maison moderne de 100 m² en nécessite 10),
- **OU** faire un peu plus de 5.000 km en zone urbaine embouteillée en Twingo, soit 6 mois de circulation en moyenne en Ile de France, et 2.500 km en gros 4x4 ou en Mercedes (en ville embouteillée aussi).

➤**OU** consommer 7.200 kWh de gaz naturel (soit quelques mois de chauffage d'un logement).

Si l'on prend en compte les autres gaz à effet de serre il suffit même de :

➤faire un aller simple à New York

➤**OU** acheter 90 kg de boeuf avec os ou 1.400 l de lait (la vache folle est donc une excellente affaire pour le réchauffement climatique).

Il faut retourner à l'âge de pierre, alors, comme d'aucunes personnes un peu contrariées par ce qui précède aiment à dire ? En fait, il y a pas mal de possibilités intermédiaires entre la situation d'aujourd'hui et l'âge de pierre..... Notons à ce propos que le discours souvent entendu du "droit au développement" ignore une réalité : même un Indien pas très bien loti vit infiniment mieux qu'un paysan français du 10^e siècle. Alors que le paysan français n'avait que sa paire de bras et un peu de bois pour se chauffer (pas beaucoup), et avait une espérance de vie de 20 à 30 ans à la naissance, l'Indien moderne a une espérance de vie à la naissance qui dépasse 60 ans et dispose, en moyenne, à travers sa consommation - même modeste - d'énergie, de [l'équivalent de 10 à 20 personnes à son service](#) (en Europe nous avons l'équivalent de 100 à 200 esclaves chacun : pas mal !).

Quoi qu'il en soit, le niveau de 50% des émissions de 1990 n'est "pas négociable", car il dépend de données physiques. Tant que nous n'y redescendons pas - [ou n'y sommes pas forcés par la géologie](#) - la concentration en CO₂ dans l'atmosphère continue d'augmenter, et la certitude d'ennuis futurs accrus - qui se chargeront, si rien d'autre ne l'a fait avant, de limiter suffisamment notre activité pour "forcer" cette baisse des émissions de CO₂ - aussi. On voit donc que [Kyoto](#) n'est qu'un timide premier pas dans la direction d'efforts considérablement plus importants.

Même sans changement climatique, l'humanité redescendra "un jour" à ce niveau de 50% des émissions de 1990, parce que [la quantité d'hydrocarbures disponible est finie](#). La seule bonne question n'est pas "est-ce que ?", mais seulement quand et comment. Dit autrement, la seule bonne question me semble être : cette décroissance peut-elle être volontaire, ou attendrons nous que des événements non souhaités s'en chargent à notre place, probablement dans des conditions bien moins agréables alors ?

Le temps que l'on met pour parvenir à cette réduction influe seulement sur :

➤ le niveau auquel la quantité de CO₂ se stabilisera (de 1,5 à 4 fois la concentration préindustrielle de CO₂), et donc l'élévation ultime de température,

➤ le temps nécessaire à la stabilisation (de moins de 1 siècle à plusieurs siècles).

Il est aussi très intéressant de noter que cette convergence vers 460 kg équivalent carbone par personne et par an possède des avocats au sein du monde "en développement". Par exemple, feu Anil AGARWAL, directeur du [Center for Science and the Environment](#) (décédé en janvier 2002) combattait l'idée d'une "convergence vers le haut, dans [un article très intéressant que j'ai mis en ligne ici](#) (en anglais seulement), même si nous n'étions probablement pas d'accord sur le nucléaire.

En fait non seulement ce maximum de 50% des émissions actuelles n'est pas négociable, mais à très long terme il est encore trop élevé : si nous souhaitons stabiliser rapidement la concentration de CO₂ dans l'air à un niveau relativement bas (450 ppm, par exemple), c'est encore plus qu'il faudra faire avant la fin du 21^è siècle .

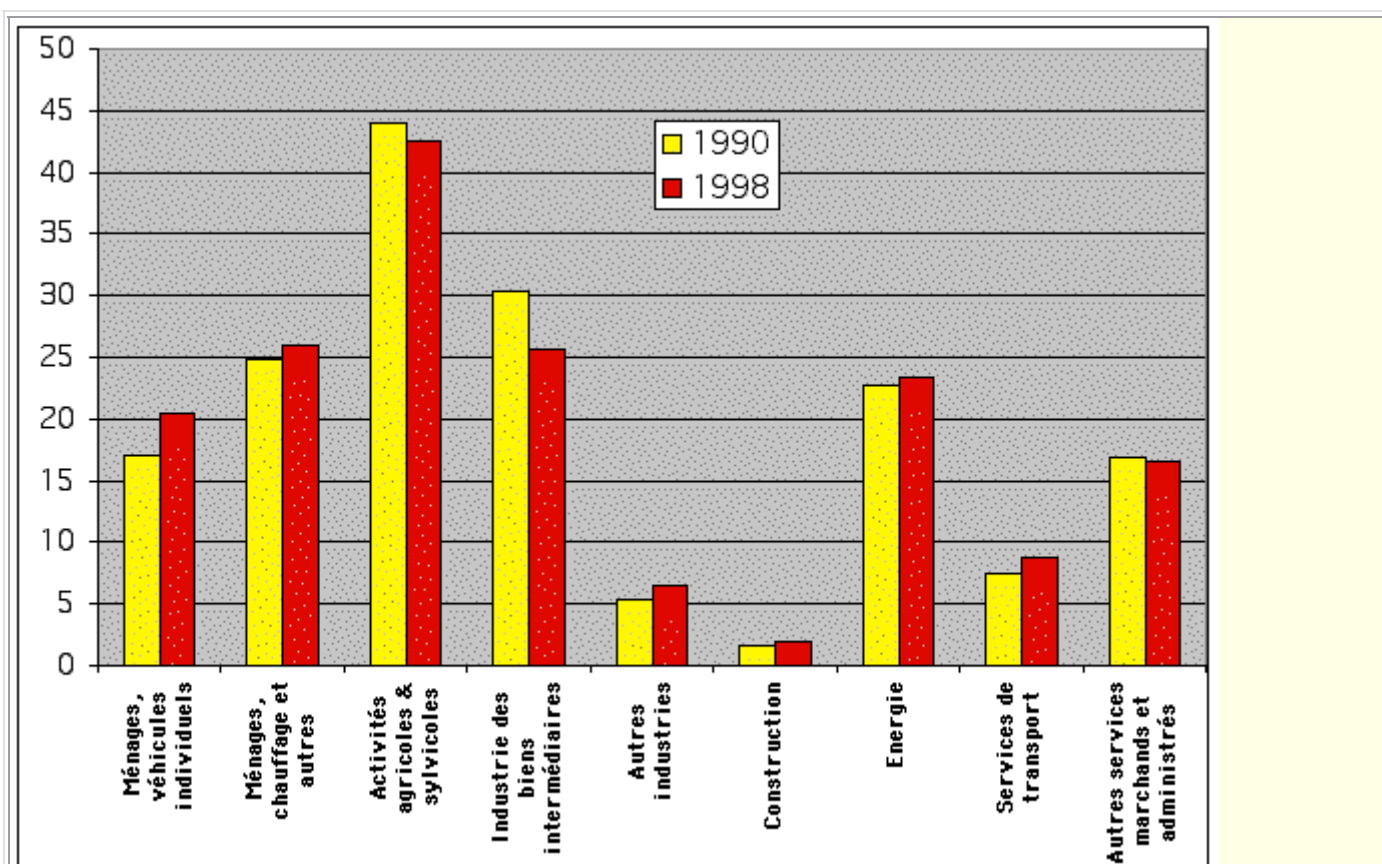
Admettons maintenant que ce soit une division par 3 qui soit notre objectif (et cela le sera un jour). Si dans le même temps, nous nous basons sur une population de 9 milliards d'individus, cela signifie que nous aurons alors à notre disposition non plus 460 kg mais environ **250 kg équivalent carbone par habitant et par an**, ou encore 10% de ce qu'un Français émet aujourd'hui (3% des émissions actuelles d'un Américain). Nous avons encore du pain sur la planche !

La voiture est-elle la principale source de gaz à effet de serre ?

février 2001 - révisé septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

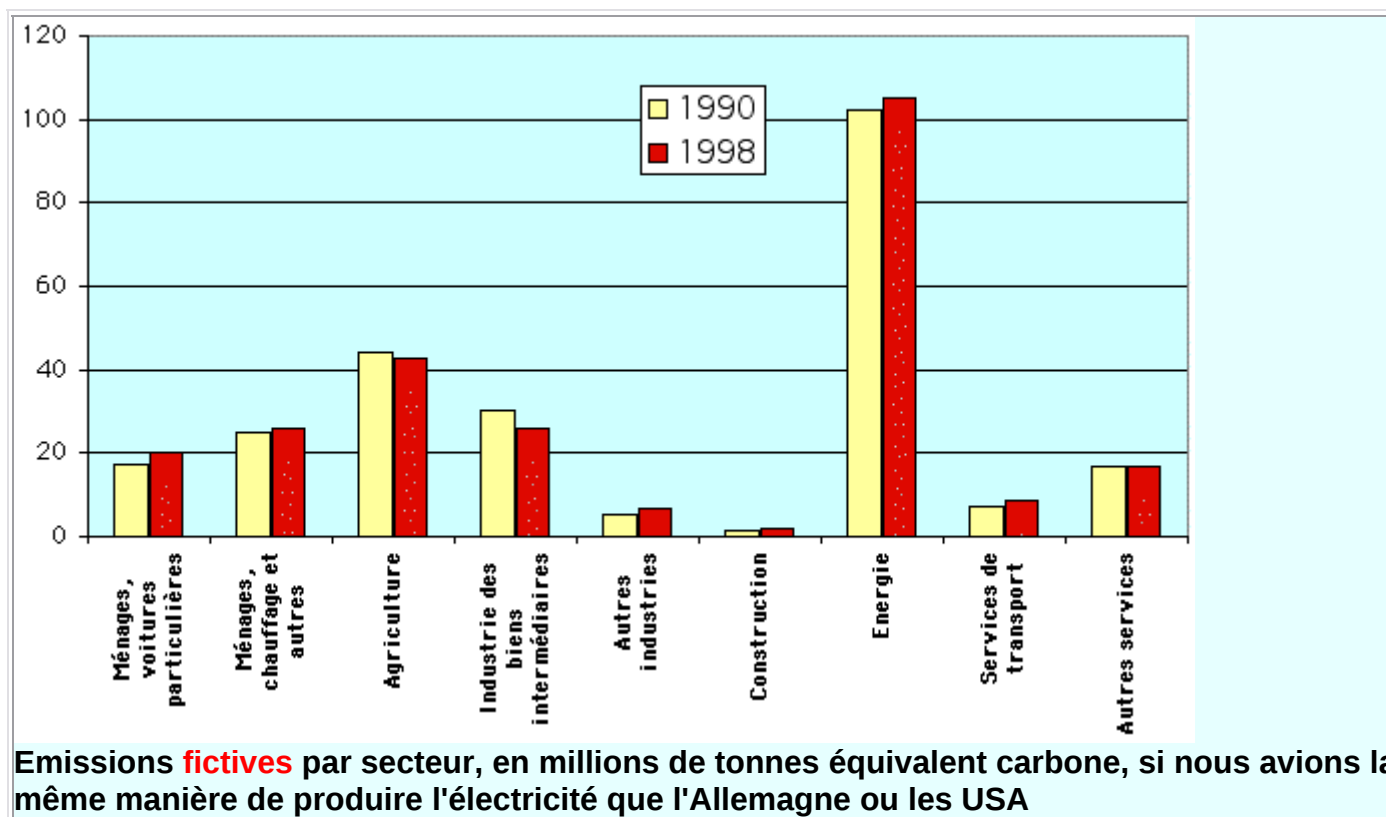
En 1998, selon l'inventaire réalisé par le [CITEPA](#), la première source de gaz à effet de serre était de très loin...l'agriculture (cf. ci-dessous).



Emissions de gaz à effet de serre en France, par secteur, en millions de tonnes équivalent carbone (tous les gaz du protocole de Kyoto)

Source : Institut Français de l'Environnement, d'après CITEPA

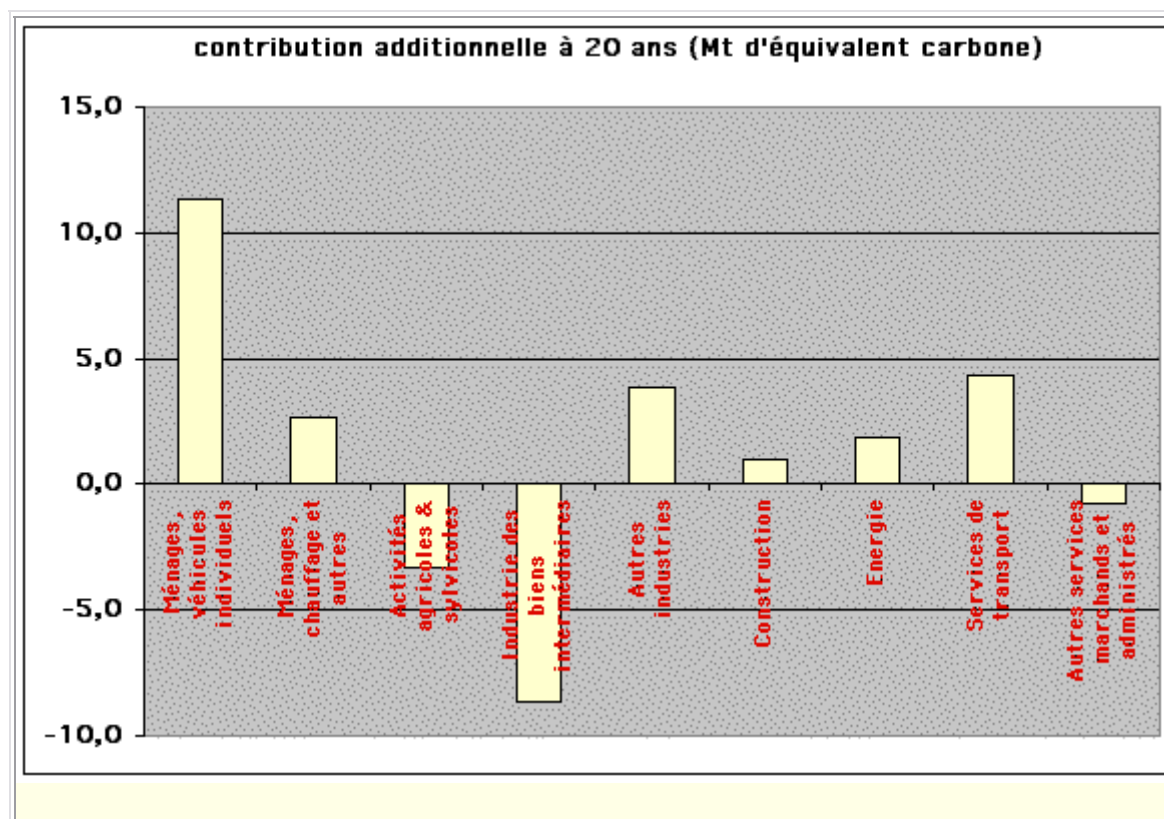
Cela est dû au fait que les [gaz à effet de serre](#) ne se résument pas au seul gaz carbonique, et que pour les autres gaz (méthane et protoxyde d'azote) l'agriculture est de très loin le premier poste d'émissions. En outre cette particularité est aussi pour partie le résultat de la faiblesse du poste "énergie", qui désigne les émissions directes des centrales électriques et des raffineries. Si nous avions la même manière de produire l'électricité que l'Allemagne ou les USA, voici ce que donnerait probablement notre classement :



Le reste des considérations ci-dessous changerait alors peut-être un peu ! Cela étant, le premier graphique ci-dessus montre que :

- les camions ne font en gros qu'un tiers des émissions des voitures particulières,
- les ménages font plus d'émissions à travers le chauffage des habitations qu'en conduisant,
- et surtout qu'ils en font plus en mangeant qu'en conduisant !!

Cela étant, sur la base des évolutions constatées de 1990 à 1998, on peut s'amuser à faire une prolongation tendancielle sur 20 ans (attention ! une prolongation tendancielle n'est pas une prévision).



Contributions additionnelles des diverses sources à 20 ans en prolongeant les taux d'évolution constatés de 1990 à 1998 (source pour les émissions et les taux d'augmentation de 1990 à 1998 : [CITEPA](#) - [IFEN](#)).

On constate alors que les deux premiers postes d'augmentation des émissions, sur cette base, sont :

- la voiture particulière (à gauche)
- les camions (poste "services de transport", avant dernier sur la droite).

Notons toutefois que ces prolongations tendanciellles sont plus ou moins légitimes selon les secteurs. En particulier, la libéralisation des marchés de l'électricité pourrait très fortement réorienter la production française vers le gaz en remplacement du nucléaire (ce qui serait plutôt une mauvaise chose du point de vue des émissions de [gaz à effet de serre](#), outre que le [gaz n'est pas renouvelable](#)), avec comme conséquence une forte accélération de la croissance des émissions dans le secteur de l'énergie et une part nettement plus importante de cette source dans les augmentations à venir.

Il n'est resté pas moins que les "efforts" concernant les transports sont parfaitement justifiés au regard de la croissance rapide des émissions, mais il ne faut pas perdre de vue que cela sera hélas très loin d'être suffisant si l'on veut [lutter efficacement contre les émissions de gaz à effet de serre](#).

Ne serons nous pas sauvés par la technique ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

On parle périodiquement de diverses solutions techniques qui nous permettraient de "continuer à vivre comme maintenant" (c'est à dire utiliser des [sources d'énergie émettant du CO₂](#)) sans que cela n'aggrave nos émissions de gaz à effet de serre, en attendant tranquillement que l'efficacité énergétique permette de les [diviser par deux](#). De quoi s'agit-il et que peut-on en espérer ?

Tout d'abord il importe de savoir que l'on ne peut pas filtrer l'atmosphère pour en retirer le gaz déjà émis. La technique ne peut donc rien sur ce plan, et ne nous évitera pas un [réchauffement programmé et inévitable](#) d'au moins 1°C à terme.

Pour le reste, on peut espérer de nombreux progrès, changement ou adaptations. Mais aujourd'hui il semble difficile qu'il y ait là de quoi nous éviter un changement de comportement par ailleurs :

➤ On peut tout d'abord [remettre sous terre le CO₂ produit](#) lorsque l'on brûle du charbon ou du pétrole. C'est une solution techniquement faisable, mais qui ne concerne que la production d'électricité et les grosses usines (ce qui laisse de côté 50% des émissions de CO₂ et toutes les émissions d'[autres gaz à effet de serre](#)). En outre c'est un dispositif qui ne sera pas installé en quelques années sur chaque source d'émission éligible, du moins pas avec la gestion des priorités que nous avons actuellement.

➤ On peut améliorer l'efficacité énergétique : cela signifie que l'on obtient le même service en brûlant moins de combustible. Mais, aussi surprenant que cela pourra sembler, cela ne conduit pas nécessairement à des économies si une contrainte sur la consommation globale n'est pas mise en place en même temps. Par exemple, les progrès faits en 15 ans sur les moteurs de voiture, de 1985 à 2000, ont été complètement annulés par le fait que les gens ont acheté dans l'intervalle des voitures plus puissantes, et pourvues de plus en plus d'accessoires (climatisation notamment) qui consomment de l'énergie.

Le résultat est que, entre 1985 et 2000 la consommation moyenne d'un véhicule neuf vendu en France n'a pas sensiblement diminué : elle a légèrement diminué de 1990 à 2000, mais avait légèrement augmenté avant.

Pour que la consommation par véhicule ait sensiblement diminué sur les 15 dernières années, il aurait fallu que tout le monde ne remplace pas une vieille R5 "inefficace" par une C5 ou une Laguna "efficace", mais remplace sa R5 par une Twingo ou une Smart, c'est-à-dire un véhicule ni plus lourd ni plus puissant, en faisant de la réduction de ses émissions une priorité par rapport à son confort.

➤ On peut [changer de sources d'énergie primaire](#). Mais comme ces sources sont souvent moins commodées à utiliser que le pétrole ou le gaz, ou plus chères, ou demandent plus de précautions (nucléaire), ou sont limitées en puissance délivrable, comme les renouvelables, il est vraisemblable que nous ne pourrons pas passer à un [monde "énergétiquement vertueux"](#) juste avec des innovations techniques.

Un argument plus général peut éventuellement être invoqué pour illustrer les limitations de la "technique". En effet, l'efficacité technologique, si elle est mise en oeuvre sans [remise en cause de la croissance matérielle perpétuelle](#), peut paradoxalement conduire à l'accroissement de la pression globale : en proposant des usages qui, de manière unitaire, sont moins "nocifs" pour l'environnement, on augmente leur acceptabilité sociale, et on diminue leur coût (chaque utilisateur paiera moins cher en ressources naturelles ou en conséquences de son comportement polluant), et cela conduit à une expansion de l'usage qui fait plus que compenser les gains unitaires.

Par exemple, si le seul [transport aérien](#) aujourd'hui disponible était celui des jets privés, certes la consommation par passager serait plusieurs dizaines de fois supérieure à ce qu'elle est sur un avion de ligne, mais de ce fait le transport aérien serait beaucoup moins abordable, et la consommation globale des avions serait probablement bien moindre. De même, si les ingénieurs n'avaient jamais su faire mieux que des voitures consommant 40 litres aux 100, avec un prix du carburant identique, il est probable que la consommation globale de l'humanité pour le transport serait inférieure, car la majorité de nos contemporains n'auraient pas les moyens de rouler en voiture.

Bref, sans contrainte socialement acceptable sur la demande globale, il se plaide assez bien qu'une efficacité unitaire accrue engendre probablement une augmentation de la consommation globale et non une diminution.

Et si le consensus existe sur l'idée de réduire la consommation globale d'énergie, la manière qui, historiquement, s'avère la plus efficace est tout simplement d'augmenter les prix, c'est-à-dire d'augmenter [la fiscalité sur l'énergie fossile](#).

Dit encore autrement, sur le long terme, le vrai déterminant de la consommation d'énergie n'est pas l'efficacité des appareils qui en consomment, mais tout simplement son prix. Ou dit encore autrement, si nous souhaitons vraiment résoudre le problème du changement climatique, ce n'est pas la voie de la recherche qui est à explorer en premier, mais la voie de la fiscalité. Refuser une fiscalité croissante (qui peut être progressive, bien sûr) sur les émissions de gaz à effet de serre (et donc sur tout ce qui vient du pétrole, du gaz et du charbon) équivaut assez fortement à refuser une action volontaire contre ce processus.

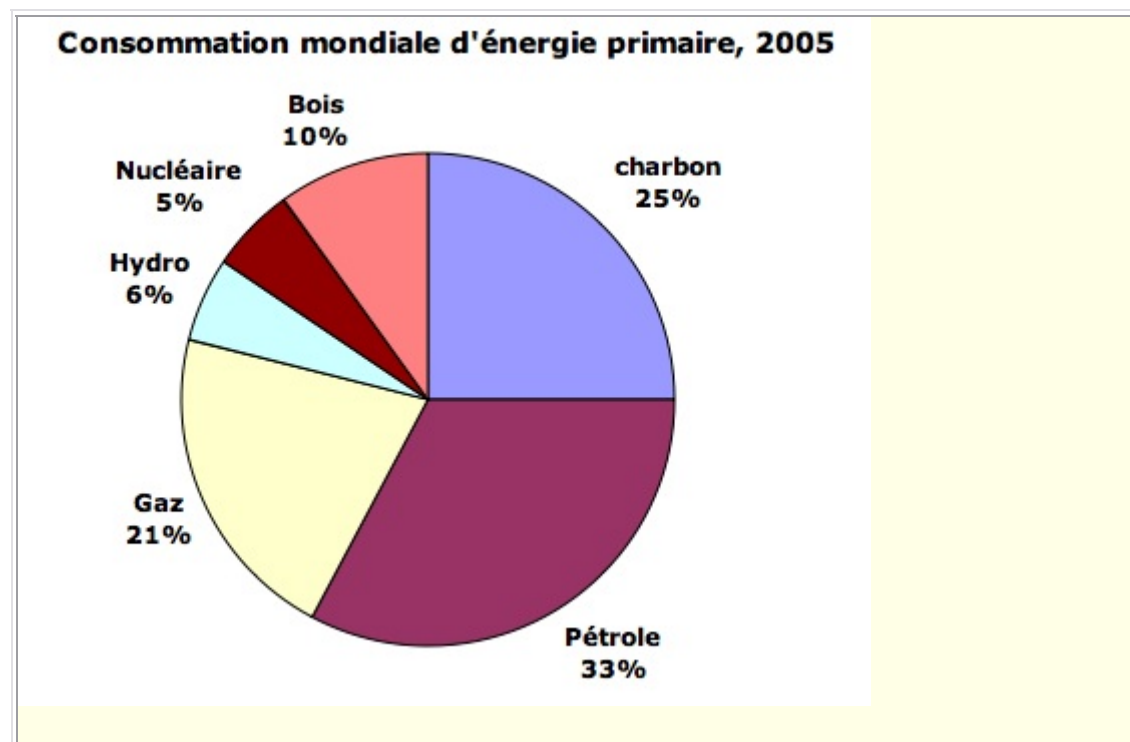
Pour en savoir plus : [l'apport du progrès technologique pour la réduction des gaz à effet de serre](#), par Maurice Claverie, in La Jaune et La Rouge de mai 2000

Ne pouvons nous pas mettre le gaz carbonique dans un grand trou ?

avril 2003 - dernière modification : août 2007

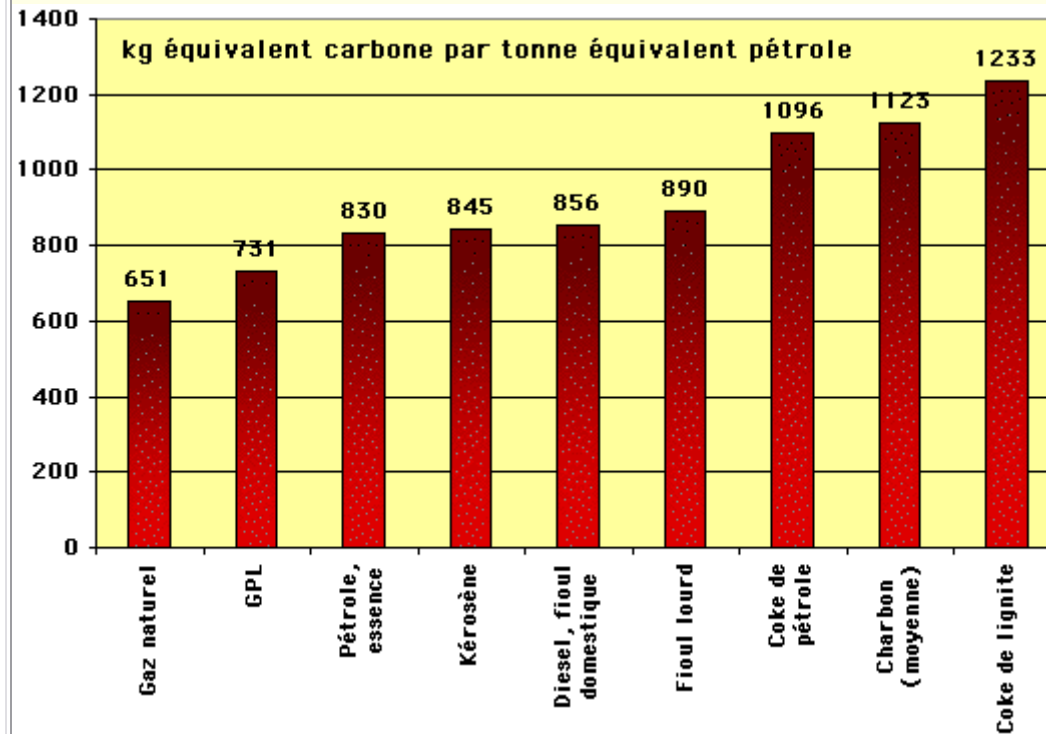
site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Actuellement, l'énergie commerciale (c'est à dire hors bois de feu, qui est souvent ramassé directement par le consommateur et ne passe donc pas par des circuits commerciaux) consommée dans le monde est constituée à plus de 85% de pétrole, gaz naturel et charbon, toutes énergies qui conduisent à des émissions de gaz carbonique lorsqu'elles sont utilisées.



Ci-dessus : répartition par nature de l'énergie primaire consommée dans le monde en 2005. Les énergies électriques sont converties sur la base de [l'énergie primaire consommée](#). Source BP Statistical Review (pour le bois, évaluation personnelle).

Ci-dessous : émissions de [gaz à effet de serre](#) par tonne équivalent pétrole (1 tonne équivalent pétrole = 11600 kWh = l'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole). Notons que le gaz naturel n'est pas "propre" : sa combustion dégage moitié moins de CO₂ que celle du charbon, mais ce n'est pas zéro ! Source [ADEME](#).



Par ailleurs si nous voulons arrêter d'enrichir l'atmosphère en gaz carbonique il faut [diviser les émissions mondiales de ce gaz par 2 au moins](#) (cela vient des conclusions des physiciens). Comment pouvons nous y parvenir ? :

- nous pouvons diviser la consommation d'énergies fossiles par deux, en remplaçant la moitié par des économies d'énergie et/ou des renouvelables et/ou du nucléaire,
- nous continuons à consommer des énergies fossiles, mais nous nous débrouillons pour ne plus envoyer le CO₂ qui résulte de leur usage dans l'atmosphère. C'est cette opération qui fait l'objet de la présente page.
- il y a aussi l'éventualité d'accélérer le fonctionnement des puits naturels de gaz carbonique, dont il est [traité sur une autre page](#).

Bien sûr, nous pouvons aussi combiner les trois marges de manoeuvre. Incidemment, notons que diminuer la consommation d'énergie, tout le monde en a entendu parler, mais tout le monde n'a peut-être pas compris ce que cela signifiait ! En effet, en première approximation, moins consommer d'énergie, fossile ou pas, c'est moins utiliser d'énergie pour se chauffer (donc avoir des logements plus petits et/ou bioclimatiques), moins utiliser d'énergie pour se déplacer (et notamment beaucoup moins d'avion et beaucoup moins de voiture), avoir moins d'électroménager et d'ascenseurs, et enfin moins consommer de produits manufacturés.

Mais revenons à la séquestration du CO₂. De quoi s'agit-il exactement ? En pratique, cette "séquestration" recouvre les opérations suivantes :

- lorsque l'on brûle un combustible fossile, on fait passer les gaz issu de leur combustion dans un dispositif qui "capture" le CO₂ (en général les gaz d'échappement sont injectés dans un liquide où le CO₂ va se dissoudre, puis le liquide avec le CO₂ dissous est transporté dans un appareil où le CO₂ est récupéré),
- ce CO₂ est alors comprimé, puis injecté - éventuellement après avoir été transporté par une espèce de gazoduc - dans le sous-sol. Les réceptacles possibles doivent avoir la propriété de ne pas laisser le CO₂ repartir vers l'atmosphère ensuite. Il peut s'agir :
 - d'anciennes mines de sel hermétiquement closes,

- ▶ de nappes aquifères salines profondes (il s'agit donc de nappes phratiques d'un genre particulier, où l'eau est salée), où le CO₂ est dissous dans l'eau,
- ▶ d'anciens réservoirs de pétrole ou de gaz naturel (dans ce cas le CO₂ peut même servir à expulser le pétrole restant),
- ▶ dans des mines de charbon dont la mise en production n'est pas envisagée (où il s'adsorberait à la place du méthane),
- ▶ et plus généralement de n'importe quel réservoir géologique étanche, car le but du jeu est bien évidemment que ce CO₂ ne ressorte plus ensuite !

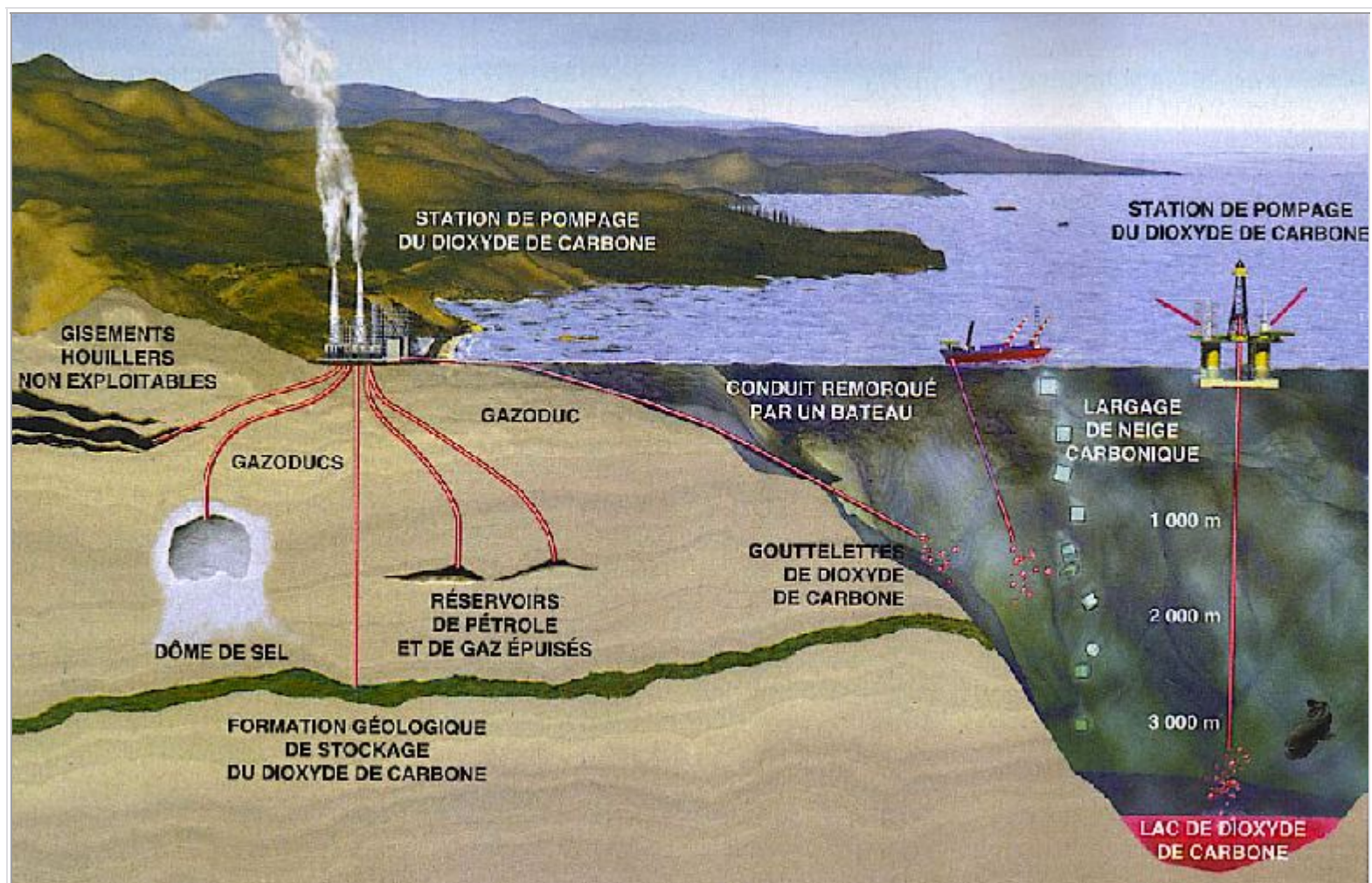
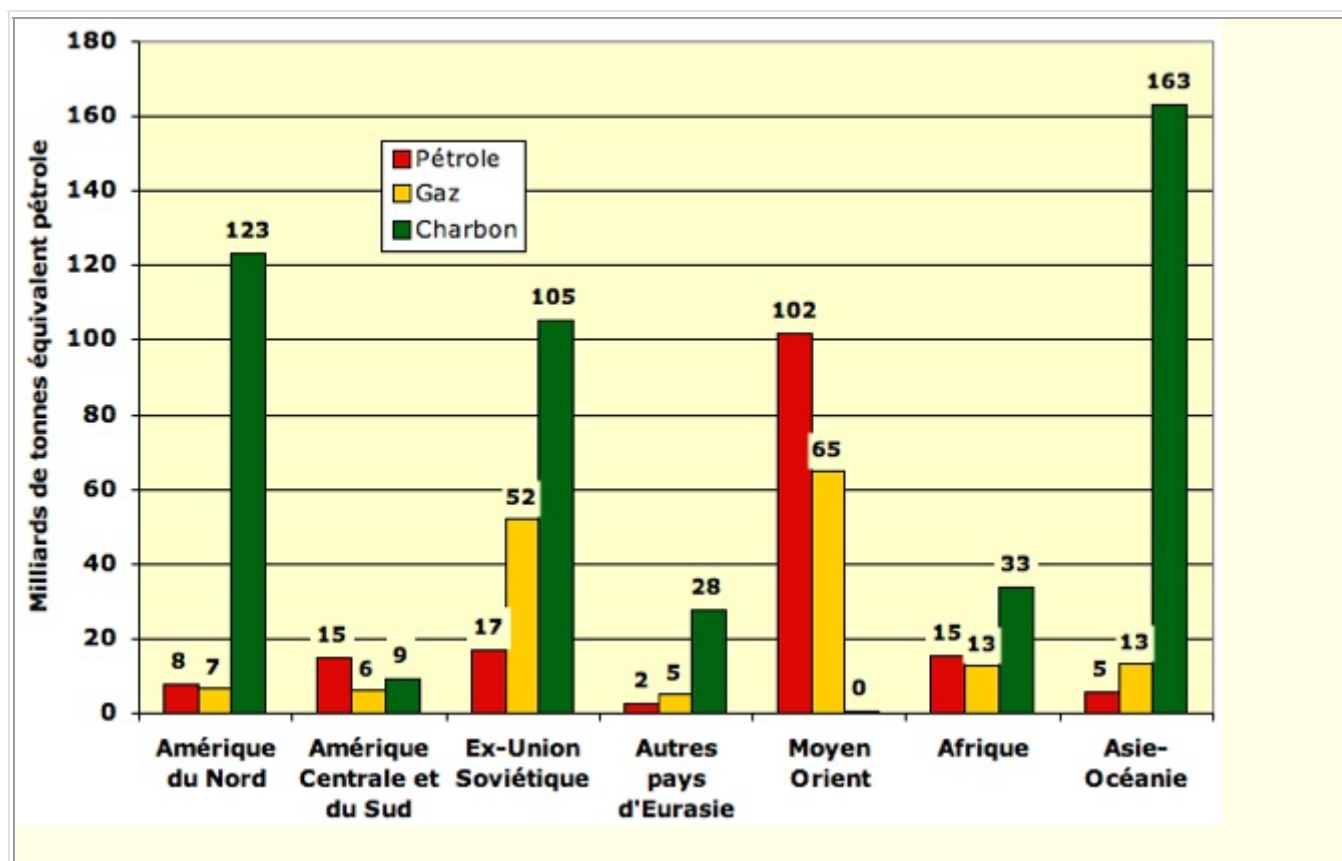


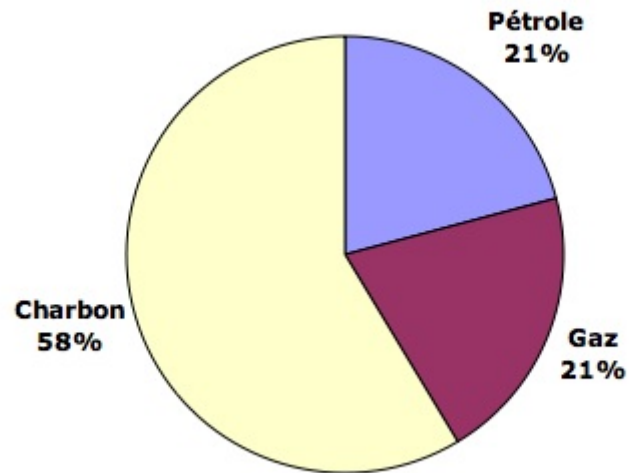
Diagramme illustrant les diverses possibilités théoriques de séquestration. "Station de pompage" ne signifie pas "station d'épuration de l'atmosphère" ! Il s'agit juste d'un endroit où le CO₂ est injecté en sous-sol.

Quels sont les avantages de ce procédé ?

L'avantage évident, c'est bien entendu que cela nous permet de moins perturber le climat à usage d'énergie fossile constant. Il y a en particulier une forme d'énergie pour laquelle cette séquestration pourrait s'avérer très intéressante, c'est le charbon, qui se trouve représenter les 2/3 des réserves prouvées de combustibles fossiles sur terre (graphique ci-dessous).



Ci-dessus : répartition par grande zone des réserves de combustibles fossiles, en milliards de tonnes équivalent pétrole. Source : BP statistical review, juin 2007. Ci-dessous, répartition par nature des réserves mondiales de combustibles fossiles.



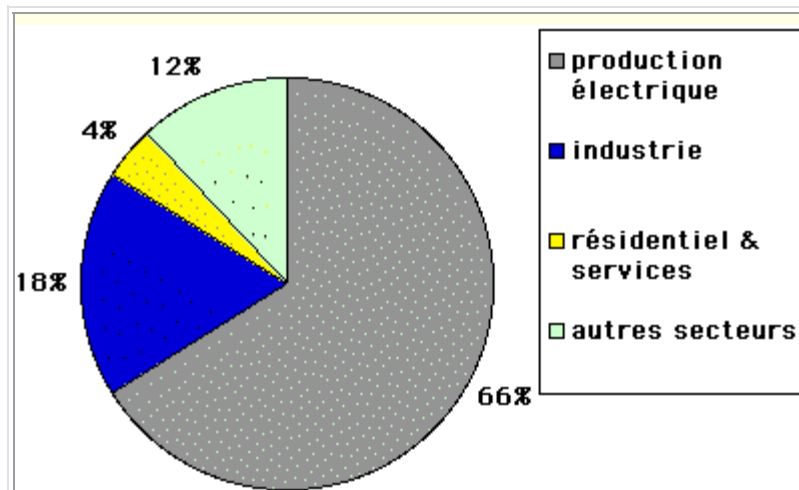
La lecture de ces graphique permet de noter les éléments suivants :

- Les réserves de charbon sont beaucoup mieux réparties que les réserves de pétrole et de gaz,
- Les zones grosses consommatrices d'énergie (aujourd'hui Amérique du Nord et Europe, et peut-être demain l'Asie) disposent toutes de réserves de charbon très significatives alors que les réserves de pétrole et de gaz de ces zones sont proches de l'épuisement,
- En particulier les USA disposent des premières réserves mondiales : on peut comprendre

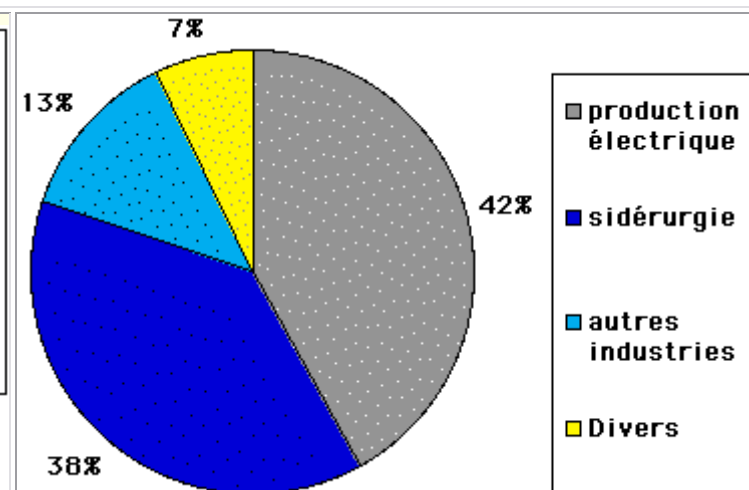
leur intérêt à se pencher sérieusement sur les techniques de séquestration du CO₂ !

➤ Mais il n'en reste pas moins que de brûler tout le pétrole, le gaz et le charbon connus (sans parler de ce qui pourrait être découvert ensuite), en envoyant tout le CO₂ dans l'atmosphère, conduirait à des émissions totales de CO₂ qui feront doubler la concentration atmosphérique actuelle de ce gaz (370 ppm). Il s'ensuivrait une [élévation de température](#) possible de 4 à 8°C (cette dernière valeur intègre un possible [déstockage des puits naturels](#)) et un [bouleversement majeur de notre planète](#).

Par ailleurs, les deux usages dominants du charbon sur terre sont la production d'acier (le charbon sert à réduire les oxydes de fer que l'on trouve dans le minerai) et surtout la production d'électricité, comme il sera facile de le constater sur les graphiques ci-dessous.



Répartition par usage du charbon consommé dans le monde en 2000 (total : 2,36 milliards de tonnes équivalent pétrole). La sidérurgie représente l'essentiel



Répartition par usage du charbon consommé en France en 2002. La plus forte proportion de la sidérurgie s'explique par le très faible recours au

du poste "industrie".

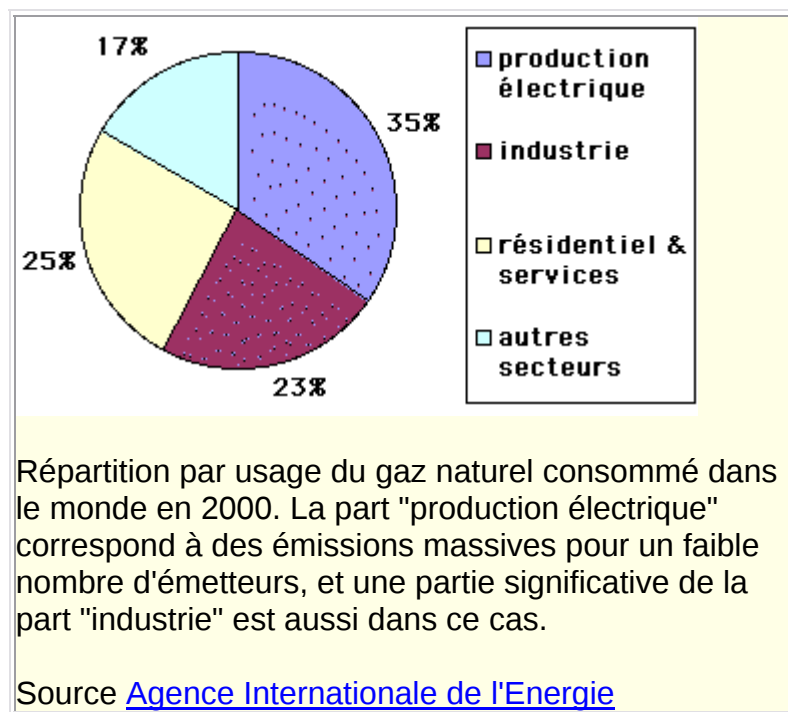
Source [Agence Internationale de l'Energie](#)

charbon en France pour produire l'électricité.

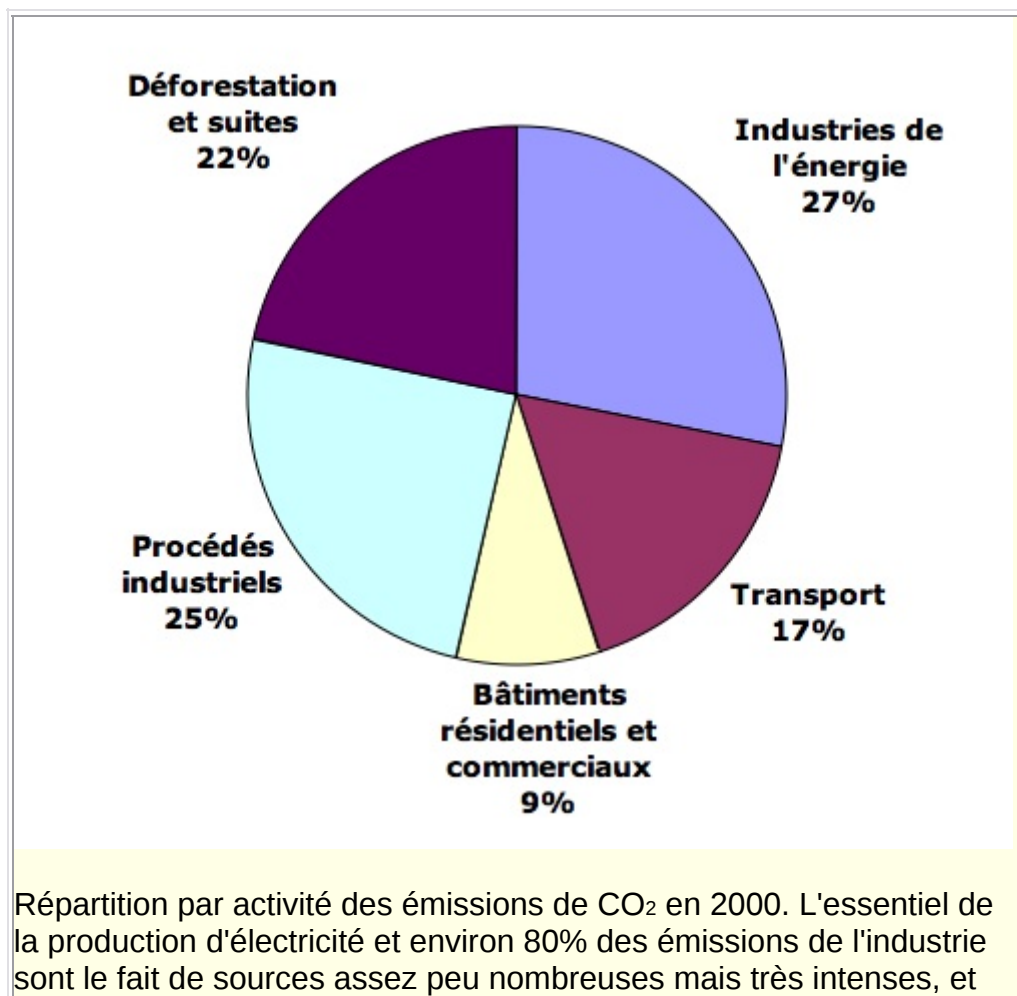
Source Observatoire de l'Energie

Ces usages (électricité et sidérurgie) ont la particularité de conduire à des émissions très "concentrées", qui ont lieu de manière massive en quelques endroits bien définis. Il est alors concevable de capturer le CO₂ émis à ces endroits là pour ensuite l'envoyer sous terre où, nous espérons, nous n'entendrons plus parler de lui.

Une configuration un peu voisine s'observe pour le gaz naturel (en fait le pétrole et le charbon sont tout autant naturels !), qui est utilisé pour une large partie pour de la production d'électricité dans le monde, de telle sorte que les émissions correspondantes pourraient être "capturées" pour être aussi mises dans un grand trou où nous n'en entendrions plus parler.



Si nous mettons bout à bout tous les usages "concentrés" de l'énergie fossile, qui ont principalement lieu dans les centrales électriques et dans les usines de production de matériaux de base (acier, métaux divers, chimie de base, ciment), nous arrivons à quelque chose qui n'est pas très éloigné de la moitié des émissions totales de CO₂ d'origine fossile.



sont donc éligibles pour un procédé de capture et de séquestration.

Source [Agence Internationale de l'Energie](#)

Or comme nous avons vu ci-dessus que [les émissions devraient être divisées par 2 pour cesser de perturber le climat](#), n'avons nous pas trouvé là une martingale ?

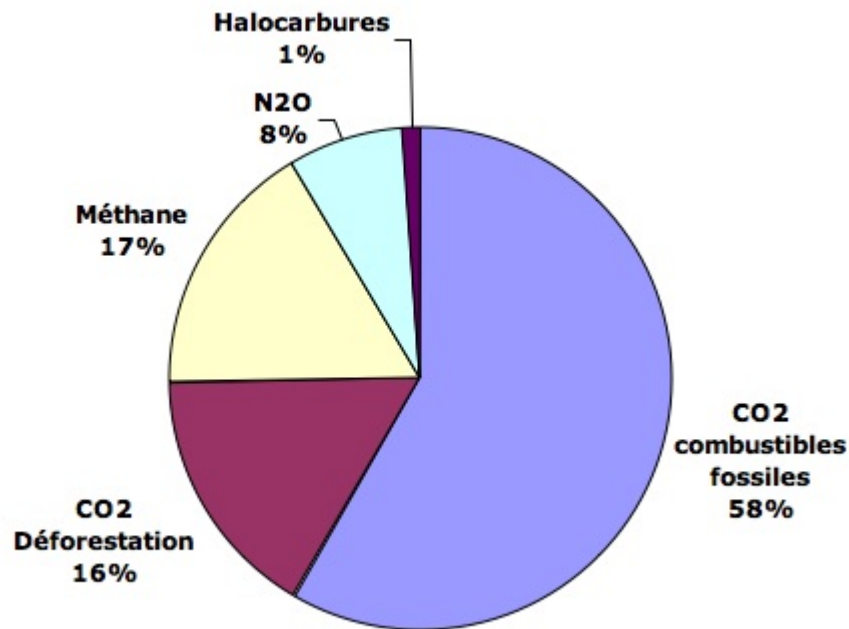
Tout beau tout rose, alors ?

Après avoir présenté le côté "à moitié plein" de la bouteille, il faut maintenant présenter le côté "à moitié vide". La séquestration du CO₂ présente aussi de nombreuses faiblesses, que nous pouvons lister comme suit :

- le premier inconvénient de cette technique est tout simplement qu'elle est encore très expérimentale. Elle a été utilisée en vraie grandeur dans quelques champs de pétrole pour faire sortir à vitesse accélérée l'huile contenu dans la roche, et il y a un cas de stockage dans un aquifère salin, pour évacuer le CO₂ d'une plate-forme pétrolière de la Mer du Nord (environ 1 million de tonnes de CO₂ par an).
- Le deuxième inconvénient est que, ici comme ailleurs, équiper l'intégralité des sources d'émission éligibles serait plus le fait de quelques décennies que de quelques mois ! "Attendre" d'avoir cette technologie à portée de la main est accepter, d'une certaine manière, la hausse des émissions tant que ce procédé n'est pas largement répandu,
- le troisième inconvénient de cette technique est que pour épurer les fumées d'usine, compresser le gaz et l'envoyer sous terre, il faut utiliser de l'énergie, et les ordres de grandeur couramment avancés sont de l'ordre de 10 à 20% de l'énergie obtenue en brûlant le combustible fossile. En d'autres termes, quand nous brûlons du charbon ou le gaz, au lieu de disposer de 100% de

l'énergie de combustion lorsque nous laissons allègrement le CO₂ partir dans l'atmosphère, nous n'en aurions plus que 80%, le reste étant alors utilisé pour envoyer le CO₂ résultant de la combustion sous terre. Cela a deux conséquences majeures :

- ▶ Si nous voulons utiliser l'ensemble des combustibles fossiles actuellement sous terre sans mettre le CO₂ dans l'atmosphère, cela diminue mécaniquement les réserves (ou plus exactement l'énergie utile provenant de ces réserves) de 20% (puisque 20% environ doit être affecté à la séquestration du CO₂ dès lors que nous utilisons ces combustibles), or au rythme actuel de croissance de la consommation, et avant même de parler de séquestration, [ces réserves seraient épuisées en un demi-siècle](#),
- ▶ toute utilisation des combustibles fossiles avec séquestration coûtera nécessairement plus cher que sans, du moins tant que [les émissions de CO₂ ne seront pas taxées](#). Or une partie significative du charbon étant utilisée soit aux USA, qui n'aiment pas les surcoûts, soit dans des pays en cours d'industrialisation, qui n'ont peut-être pas les disponibilités financières nécessaires, il n'est pas garanti que toute source éligible souhaitera s'équiper,
- ▶ en particulier, pour le cas de l'électricité, [la libéralisation qui a lieu un peu partout](#) a pour conséquence que tout centime de surcoût sur le kWh produit est vu comme une horreur par les producteurs, qui se battent donc bec et ongles contre.
- ▶ le quatrième inconvénient de cette technique est que seules les sources "concentrées" de CO₂ sont éligibles. Certes cela représente la moitié des émissions de CO₂ provenant de l'énergie, mais pour l'autre moitié il n'est pas possible d'y recourir. Cela élimine donc :
 - ▶ les transports, qui connaissent une croissance très importante (en leur sein c'est le transport aérien, le plus gourmand en carburant par passager, qui augmente le plus vite),
 - ▶ les chaudières de maison ou de bureaux,
 - ▶ la "petite" industrie,
- ▶ enfin une dernière limitation est que le CO₂ provenant de l'énergie fossile ne représente lui-même qu'un gros 50% du problème.



Part relative de chaque gaz à effet de serre dans le total des émissions d'origine humaine, hors ozone (qui n'a pas de source directe). La contribution de l'ozone au forçage radiatif n'étant pas très éloignée de celle du méthane, il s'ensuit que le CO₂ d'origine fossile représente environ 50% de la perturbation d'origine humaine.

Source [GIEC](#), 2007

Par voie de conséquence, séquestrer 50% de 50% du problème porte sur 25% de ce dernier. Ce n'est surtout pas à négliger (oh que non !), mais ne peut constituer une solution suffisante pour ne plus entendre parler d'éventuels ennuis. En particulier, si la consommation d'énergie est multipliée par 4 (ce qui est incontournable pour permettre à 6 à 9 milliards d'habitants de vivre comme un [Européen d'aujourd'hui](#), la bonne question étant de savoir si [cela doit constituer un objectif souhaitable](#)), avec la même

proportion pour chaque source que celle que nous connaissons en 2006 (c'est à dire 85% pour les énergies fossiles, et 15% pour les sources "sans carbone" que sont l'hydroélectricité et le nucléaire), les émissions seront multipliées par 4 aussi.

Si la séquestration, à supposer qu'elle soit un jour techniquement au point, pouvait éviter la moitié des émissions de CO₂ correspondantes, nous aurions encore une perturbation climatique double de celle d'aujourd'hui (et [4 fois trop importante pour stabiliser la concentration en CO₂ dans l'air](#)). Il y a donc là à la fois une marge de manoeuvre majeure (certains industriels ne s'y sont pas trompés, qui commencent à investir massivement dans des recherches sur la question) mais insuffisante pour nous dispenser de tout autre [effort sur les consommations](#) et la modification du "mix" énergétique.

Si la collectivité souhaite agir, que peut-elle faire ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Quiconque souhaite gérer le problème du changement climatique doit en fait agir sur deux tableaux :

➤ Il faut [diminuer les émissions](#), pour atténuer l'ampleur du problème et diminuer les [risques futurs](#), car, de même que cela a toujours un sens pour un fumeur de s'arrêter de fumer, quel que soit son état de santé de départ, cela a toujours un sens pour nous, quel que soit l'état de notre environnement, de ne pas l'aggraver,

➤ Il faut se préparer au [réchauffement inéluctable](#) découlant des [gaz à effet de serre supplémentaires déjà présents dans l'atmosphère](#), qui à eux seuls [assurent déjà 1,5 à 2 °C de réchauffement à quelques siècles d'échéance](#), ce qui est beaucoup comparé aux [variations passées](#).

Si nous regardons la question de la réduction, le point important est qu'une telle réduction ne peut s'organiser [que de manière internationale](#), car :

➤ le changement climatique se manifestera partout dans le monde, sans être circonscrit aux zones qui sont les plus "pollueuses" en gaz à effet de serre, et n'offrira [aucun sanctuaire](#),

➤ compte tenu de la durée de vie des [gaz à effet de serre](#) dans l'atmosphère, un seul gros "[mauvais joueur](#)" (les USA actuellement, peut-être la Chine demain) peut suffire pour réduire à néant les efforts des autres pays, si efforts il y a.

C'est la raison pour laquelle ce problème du changement climatique fait périodiquement l'objet de réunions internationales, dans le cadre de la [Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique](#).

Ensuite, trois variables sont disponibles pour réduire ces émissions :

➤ le [progrès technologique](#), qui permet de réduire les émissions unitaires,

➤ la [substitution au niveau des sources d'énergie primaire](#),

➤ les économies d'énergie provenant de [modes d'organisation et de "développement" différents de la société](#). Mais nous n'en prenons pas le chemin ! En effet, dès lors qu'il faut arbitrer entre le court terme, incitant à une plus grande consommation d'énergie (construction d'une nouvelle autoroute, d'un [nouvel aéroport](#), baisse d'impôts pour inciter les gens à consommer plus, etc) et le long terme, qui supposerait que l'on "freine" la consommation d'énergie, ce qui voudra souvent dire qu'il faut freiner la consommation matérielle tout court (via la création de taxes ou la hausse de taxes existantes, par exemple), c'est très souvent le court terme qui est privilégié.

Il est donc extrêmement improbable que sans volonté explicite nous arrivions rapidement à une baisse significative, au niveau mondial, des émissions de gaz à effet de serre (en fait je devrais dire une baisse significative et volontaire, car une telle baisse arrivera de toute façon comme conséquence de la finitude du monde). Une baisse significative s'entend comme une diminution de moitié, voire plus, [en quelques décennies](#), des émissions mondiales.

En ce qui concerne la **préparation aux conséquences inéluctables**, la difficulté qu'il y a à donner des prédictions régionales détaillées limite les "recommandations" pour renforcer la robustesse de notre civilisation à des choses très générales :

- Diversifier l'agriculture, pour la rendre moins vulnérable, et disposer d'espèces que l'on peut espérer adaptées à des conditions climatiques différentes des conditions actuelles,
- Augmenter la résistance des infrastructures indispensables (dont celles liées à la production & distribution d'électricité) au vent, à l'excès ou au contraire au déficit d'eau, aux incendies... Mais soyons clairs : toutes les autoroutes et tous les aéroports ne sont PAS indispensables ! Par contre je mettrais plus volontiers les voies ferrées dans cette catégorie.
- renforcer les défenses anti-feu dans les forêts,
- reconstituer des stocks de tout et n'importe quoi (car le flux tendu suppose des voies de communication en bon état, et de l'énergie abondante...),
- Ne pas construire en zone inondable (les inondations vont très certainement augmenter)
- Développer la pisciculture (sans choisir des espèces carnivores, nourries avec des poissons pêchés, ce qui n'est alors qu'un déplacement du problème !)
- Et....l'exercice n'a pas dû être fait souvent : la (longue) liste est ouverte !

Quels sont les objectifs des négociations internationales ?

dernière version : novembre 2004

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Les suites de la convention de Rio

Des négociations internationales sur les émissions de gaz à effet de serre ont pris place depuis la Convention de Rio sur le climat (dite encore Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique), signée en 1992 par à peu près tous les pays du monde lors du Sommet de la Terre. L'une des conclusions essentielle de cette convention sur le climat était qu'il fallait "**stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique**".

Entre 1992 et 1994, cette convention de Rio a été ratifiée par 175 Etats (c'est-à-dire à peu près tous les pays du monde, dont les USA) et la Communauté européenne. La Convention Climat ne contient cependant pas d'élément sur ce que devrait être le niveau auquel on stabilise les gaz à effet de serre, le rythme de baisse des émissions pour parvenir à cet objectif, la répartition de l'effort entre les divers pays, et plus généralement ne contient pas de mesures concrètes permettant d'arriver au but fixé. Elle a confié les discussions sur ce genre de "détails" (!) à des négociations ultérieures, devant prendre place lors de réunions périodiques des signataires de la Convention.

Ces réunions de tous les signataires de la Convention Climat s'appellent, dans le jargon de la convention, des "Conferences of the Parties", ou COP. En pratique il y en a une par an.

Dates et lieux des "Conferences of the Parties" depuis 1995		
COP	Année	Lieu
1	1995	Berlin, Allemagne
2	1996	Geneve, Suisse
3	1997	Kyoto, Japon
4	1998	Buenos Aires, Argentine
5	1999	Bonn, Allemagne
6	2000	La Hague, Pays Bas
7	2001	Marrakech, Maroc
8	2002	New Delhi, Inde
9	2003	Milan, Italie
10	2004	Buenos Aires, Argentine

11	2005	Montréal, Canada
12	2006	Nairobi, Kenya
13	2007	Bali, Indonésie
14	2008	Poznan, Pologne
15	2009	Copenhague, Danemark

Si la Convention Climat n'a pas fixé de calendrier précis ou de répartition précise de l'effort, elle a cependant séparé les pays signataires en deux catégories :

➤ceux qui sont - au moins officiellement - prêts à s'engager à réduire leurs émissions font partie de "annexe 1" ; il s'agit essentiellement des pays développés, et des pays dits "en transition" (pays d'Europe de l'Est).

➤mes autres sont ceux qui ne sont pas prêts à s'engager à réduire leurs émissions ; il s'agit essentiellement des pays "en voie de développement" (mais pas seulement : on y trouve aussi la Corée du Sud, par exemple).

Pour les mesures concrètes, la Convention a renvoyé cela à des "protocoles", c'est-à-dire des annexes à venir, détaillant justement les points laissés de côté au moment de la signature à Rio. La Convention Climat précisait cependant que ces protocoles additionnels pouvaient très bien ne pas être signés par tous les pays. Le protocole de Kyoto, adopté en 1997, et ratifié de 1997 à 2004, est l'un de ces protocoles. Les pays qui ne l'ont pas ratifié, dont les Etats-Unis, se retrouvent alors dans une situation un peu particulière : ils se sont engagés sur l'objectif (de participer à la stabilisation de la concentration en gaz à effet de serre), sans dire comment - et à quelle vitesse - ils allaient le faire !

Un objectif quantitatif inexistant pour le moment

Comme nous l'avons vu plus haut, la convention de Rio ne définit l'objectif à atteindre que de manière qualitative : il s'agit de rester sous le niveau qui "empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique". Malheureusement, cette formulation n'est pas suffisante pour passer à l'action, car :

➤ personne ne sait quelle est la concentration de gaz à effet de serre "qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique"

➤ les niveaux auxquels nous sommes déjà sont sans précédent dans l'histoire humaine,

➤ il est donc strictement impossible de s'inspirer du passé pour savoir où est le seuil en dessous duquel nous ne courons aucun danger,

➤ vu "l'effet retard" du réchauffement par rapport aux concentrations en gaz à effet de serre, nous avons peut-être déjà largement dépassé la cote d'alerte pour éviter des catastrophes majeures dans un futur plus ou moins lointain. Le danger ne provient pas seulement du niveau de CO₂ auquel nous parviendrons (il y a déjà eu des concentrations fortes avant l'apparition de l'homme), mais surtout de la vitesse à laquelle nous y allons : en forçant le système climatique à un rythme inconnu dans le cadre des évolutions naturelles récentes, nous risquons d'enclencher des déplacements d'équilibre violents et incontrôlables.

➤ en conséquence de ce qui précède, les engagements annoncés à Kyoto de diminuer d'ici à 2008-2012 les émissions des pays développés de 5,2% ne constituent pas une réponse élaborée scientifiquement pour se couvrir d'un risque dûment identifié ; il s'agit simplement du résultat de négociations politiques sur la base du constat "qu'il faut faire quelque chose", et qui résulte surtout de ce que chacun était prêt à faire en arrivant à Kyoto,

➤ c'est donc un premier pas indispensable, qui a l'avantage de donner une impulsion incontournable (il est en effet difficile de diviser par deux avant d'avoir réduit de 5% !) à l'évolution en cours, mais qui reste insuffisant en regard de ce à quoi il faudra parvenir un jour.

Il y a cependant un mot essentiel dans cette formulation de la Convention Climat : c'est celui de "stabilisation". En effet, le simple fait de stabiliser la concentration de CO₂, ce qui est indispensable pour stabiliser la perturbation de l'ensemble des gaz à effet de serre, suppose de diviser les émissions mondiales par au moins 2. L'objectif est donc extrêmement ambitieux : si l'on excepte le CO₂ qui pourrait être "capturé" avant d'être envoyé dans l'atmosphère, cela signifie qu'il faut parvenir à diviser volontairement la consommation de gaz, de pétrole et de charbon par 2 au niveau mondial. L'alternative à ceci n'est pas une consommation qui va croître indéfiniment, bien sûr : c'est juste la garantie d'une diminution involontaire !

Qui s'est engagé sur quoi ?

Comme expliqué plus haut, le protocole de Kyoto est le premier texte annexé à la Convention Climat qui contient des objectifs quantitatifs et un calendrier. L'objectif global est que les pays de l'Annexe I diminuent, collectivement, leurs émissions de 5,2% par rapport au niveau de 1990. La date à laquelle il faut parvenir à cet objectif est présentée de manière inhabituelle : ce n'est pas une année précise qui est indiquée, mais une fourchette de dates, qui est 2008- 2012. Ce que cela signifie, c'est que chaque pays qui a souscrit un objectif doit y parvenir "en moyenne" entre 2008 et 2012, ou plus exactement que si l'on fait la moyenne de ses émissions sur la période 2008-2012, cette moyenne doit être inférieure de X% (X% étant l'engagement du pays) à la valeur de 1990.

Si l'objectif de Kyoto est global, cependant, chaque pays n'a pas pris d'engagement au même niveau en ce qui concerne ses émissions. Certains d'entre eux ont même pris l'engagement....d'augmenter leurs émissions ! (en fait l'engagement est de ne pas les augmenter plus que ce qui est indiqué, mais comme nous le verrons ci-dessous même cela n'est pas en voie de se faire pour certain d'entre eux).

Pays signataire	CO₂ fossile seul en 1990 (milliers de tonnes équivalent carbone)	Engagement du pays dans le protocole de Kyoto
Allemagne	269 136	-21,0%
Australie	72 352	8,0%
Autriche	12 732	-13,0%
Belgique	28 415	-7,5%
Bulgarie	26 044	-8,0%
Canada	113 370	-6,0%

Croatie	?	-5,0%
Danemark	14 050	-21,0%
Espagne	56 093	15,0%
Estonie	10 141	-8,0%
Finlande	14 697	0,0%
France	97 561	0,0%
Grande Bretagne	152 091	-12,5%
Grèce	21 080	25,0%
Hongrie	21 842	-6,0%
Irlande	8 067	13,0%
Islande	456	10,0%
Italie	108 633	-6,5%
Japon	287 172	-6,0%
Lettonie	6 602	-8,0%
Liechtenstein	?	-8,0%
Lituanie	10 181	-8,0%
Luxembourg	3 309	-28,0%
Monaco	29	-8,0%
Norvège	7 192	1,0%
Nouvelle Zélande	6 108	0,0%
Pays-Bas	43 375	-6,0%
Pologne	126 272	-6,0%
Portugal	10 642	27,0%
République Tchèque	43 656	-8,0%
Roumanie	50 611	-8,0%
Russie	626 973	0,0%

Slovaquie	15 461	-8,0%
Slovénie	3 626	-8,0%
Suède	13 999	4,0%
Suisse	10 820	-8,0%
Ukraine	183 293	0,0%
USA	1 320 132	-7,0%

Quand est-ce que cela commence ?

L'une des dispositions du Protocole de Kyoto indique que ce texte deviendra contraignant pour les pays qui l'ont ratifié lorsque 55 pays au moins, représentant au moins 55% des émissions mondiales de 1990, auront ratifié ce protocole. En septembre 2003, le nombre de 55 ratifications n'était plus un problème : près de 100 pays avaient alors ratifié le protocole. Mais les Etats Unis se sont retirés du processus et la Russie n'avait alors pas encore ratifié ce texte. A eux deux, ces pays représentent plus de 45% des émissions mondiales de 1990, et donc le protocole de Kyoto ne pouvait entrer en vigueur tant qu'aucun de ces deux pays ne le ratifiait.

La ratification de la Russie a donc "changé la donne", en permettant de franchir ce seuil fatidique de 55% des émissions mondiales de 1990, et le protocole aura donc force de traité, pour ses signataires, à partir du 16 février 2005.

La position des USA ne peut être considérée comme définitive, même s'il est à peu près certain que le protocole de Kyoto ne sera jamais ratifié par ce pays : en 2002 leurs émissions de gaz à effet de serre - avec puits - étaient de 20% supérieures à celles de 1990, alors que leur engagement était une baisse de 7%, la différence - plus de 25% - étant totalement irrattrapable de manière volontaire en 5 ans. Cependant, comme les problèmes liés au changement climatique ne [peuvent qu'aller croissant au cours des décennies à venir](#), et comme la pression de l'opinion - y compris de l'[opinion américaine](#) - ne peut donc qu'augmenter avec le temps (la seule alternative serait que la décroissance des émissions soit un produit dérivé d'un problème majeur à court terme, mais alors nous aurions notre processus de réduction de manière automatique !), et comme les USA ne supporteront pas indéfiniment de passer de plus en plus de l'état de lumière du monde à l'état de honte du monde, étiquette qu'une fraction

croissante de gens leur attribue quand il s'agit du climat, ma conviction est que tout cela n'est qu'une affaire de temps : finalement, les USA seront partie intégrante du processus, tout comme la Russie le devient.

La seule bonne question est de savoir si cela arrivera assez tôt pour que nous puissions encore éviter d'[avoir plus tard des conséquences que nous regretterions....](#)

Kyoto, ce sera fastoche ?

Si les négociations concernant la ratification de Kyoto ont été si difficiles, est-ce parce que l'objectif était difficile à atteindre ? Eh bien, pas seulement.... Il est intéressant de voir sur la tableau suivant, par exemple, que pour la Russie ce sera du gâteau : son objectif est de ne pas augmenter ses émissions de 1990 à l'échéance 2008 - 2012, quand en 1999 elles étaient de 47% sous le niveau de 1990 ! (pour le seul CO₂, provenant de la combustion de combustibles fossiles, et pour 2003, le niveau de baisse par rapport à 1990 est probablement plus proche de 20%, mais c'est encore très en dessous).

Pays	Dernière année de communication des émissions à l'UNFCCC	Evolution entre cette dernière année et 1990 (en %)	Engagement de Kyoto (%)
Allemagne	2001	-17,7	-21
Australie	2000	6,3	8
Autriche	2001	13,6	-13
Belgique	2001	6,5	-7,5
Bulgarie (*)	2001	-59,7	-8
Canada	2001	36,5	-6
Danemark	2001	-0,4	-21
Espagne	2001	36,8	15
Etats Unis	2001	20,3	-7
Finlande	2001	19,8	0

France	2001	-2,1	0
Grèce	2001	23,1	25
Hongrie (*)	2001	-25	-6
Irlande	2001	30,4	13
Italie	2001	8,5	-6,5
Japon (*)	2001	9,4	-6
Norvège	2001	-11,9	1
Nouvelle Zélande	2001	21,3	0
Pays Bas	2001	4,6	-6
Pologne (*)	2001	-37,9	-6
Portugal	2001	32,9	27
République Tchèque	2001	-24,4	-8
Roumanie (*)	2001	-46,8	-8
Royaume Uni	2001	-12,3	-12,5
Russie	1999	-47,7	0
Slovaquie	2001	-35,7	-8
Suède	2001	-28,8	4
Suisse	2001	4,1	-8
Ukraine	1998	-55,5	0
Emissions d'une partie des pays de l'Annexe I			
(*) : exclut les changements d'usage des sols ("puits" et déforestation)			
Source : UNFCCC			

Le "manque de volonté" de ratifier Kyoto en Russie n'était donc pas la conséquence d'un effort de court terme, qui n'existe pas dans ce pays, tout comme il n'existe pas dans tous les pays d'Europe de l'Est, qui ont connu une très forte baisse des émissions

après la chute des régimes communistes. A l'opposé, certains pays qui ont ratifié Kyoto sont aujourd'hui très au-dessus de leurs émissions de 1990. C'est par exemple le cas de l'Italie (15% d'émissions en plus en 2001 comparé à son objectif pour 2008 - 2012), du Japon (15% d'émissions en plus en 2001 comparé à son objectif pour 2008 - 2012), de l'Espagne (20% d'émissions en plus en 2001 comparé à son objectif pour 2008 - 2012), et surtout du Canada (plus de 40% d'émissions en plus en 2001 comparé à son objectif pour 2008 - 2012 !).

Un autre fait intéressant est qu'il n'y a pas de lien direct entre l'évolution des émissions et la réputation "écologique" des pays : la Suède (avec une réputation "écologique" élevée) va avoir la partie facile (ce pays était autorisé à augmenter ses émissions de 4%, alors qu'il les a baissées de presque 30% en 2001), quand l'Autriche et le Danemark (qui ont aussi une réputation "écologique" en France) sont tous les deux 20 à 30% au dessus de leur objectif. La Finlande et la Norvège, que l'on pourrait croire identiques vues de France, ont connu des évolutions tout à fait opposées.

En Europe, les seuls grands pays qui sont pour le moment en ligne avec leur objectif sont l'Allemagne, le Royaume Uni, et la France. Mais attention, Kyoto c'est juste le [début de ce qu'il faut faire](#) !

pour en savoir plus :

➤télécharger le [texte de la Convention Climat](#)

➤télécharger le [texte du protocole de Kyoto](#)

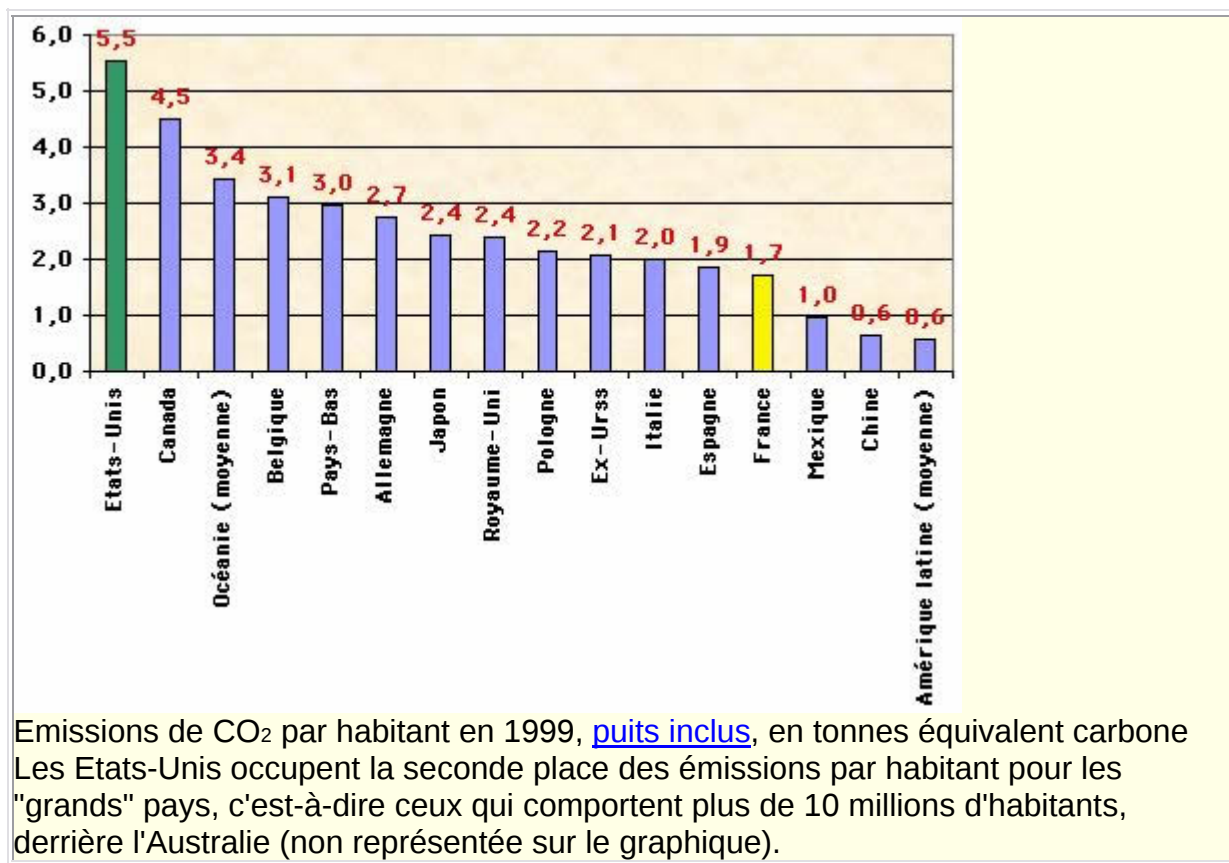
➤télécharger la [liste des signataires et l'état des ratifications](#) du protocole de Kyoto

Les Américains sont-ils les rois des affreux ?

décembre 2003 - révisé mars 2006

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Incontestablement, nos amis d'outre -Atlantique sont très mal placés dans la "course au changement climatique" : non seulement leur pays est le premier émetteur de gaz à effet de serre au monde, avec 25% des émissions planétaires à eux tous seuls (pour moins de 5% de la population mondiale), mais en outre ils ont des émissions par habitant qui sont parmi les premières au monde.



Il est donc fréquent de considérer que nous sommes de "bons élèves", ayant déjà fait de gros efforts, et pouvant nous proposer en exemple dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre à des Américains qui seraient des fumistes rétifs à toute discipline en la matière. La réalité est-elle aussi simple ?

Les Américains sont-ils plus désireux que nous de "polluer le climat" ?

Pour en vouloir fortement aux Américains, il faudrait que non seulement ils soient de gros "empoisonneurs du climat", ce qu'ils sont objectivement, mais aussi qu'ils soient heureux de l'être et n'aient aucune intention de changer les choses. Au moment où George "Dubiou" Bush a déclaré que "le mode de vie américain n'était pas négociable", et que son pays ne ratifierait pas le [protocole de Kyoto](#), qu'en pensaient les citoyens ? Ont-ils considéré, comme leur président du moment, que la diminution de 7% des émissions américaines (objectif pour les Etats-Unis dans le protocole de Kyoto) était un sacrifice excessif ?

Bien évidemment, de multiples sondages ont été faits sur la question. En voici les résultats d'un, réalisé en avril 2001 par Gallup pour l'université de Princeton :

Question posée en avril 2001	oui	non
Comme vous le savez, George W. Bush a décidé que les Etats Unis devaient se retirer de l'accord sur le réchauffement global adopté en 1997 à Kyoto. Approuvez vous cette décision ?	25%	47%

En voici les résultats d'un autre sondage, réalisé en juin 2002 pour le Chicago Council on Foreign Relations et le German Marshall Fund of the United States :

Question posée en juin 2002	oui	non
Sur la base de vos connaissances, pensez vous que les Etats-Unis devraient participer au Protocole de Kyoto ?	64%	21%

Enfin si pose aux Américains la question suivante (en 2002) : "Comment considérez vous la manière dont l'administration de George Bush gère la question du changement climatique ?", voici ce qu'ils répondent (la même question a été posée à des européens, pour donner un élément de comparaison).

Niveau d'appréciation	Etats-Unis	Europe
Excellent	6%	2%
Bien	19%	11%
Acceptable	32%	27%
Mauvais	33%	50%
Sans opinion	10%	10%

Un sondage plus récent (mars 2006) montre que l'état de l'opinion, par certains côtés, est identique à ce qu'il est en France, même si on admirera l'aptitude de l'institut de sondage à laisser penser que "sortir du pétrole" c'est nécessairement "développer des sources d'énergie alternatives", c'est-à-dire conserver les avantages de la trajectoire actuelle sans les inconvénients (pas question d'économies dans cette affaire !). En outre il est impossible de déduire de certaines questions la cause première de la réponse (la crainte de manquer de pétrole, ou celle de polluer le climat ?).

Bref les questions ci-dessous sont finalement aussi mal ficelées que celles des instituts de sondage français (par exemple la substitution fossiles -> renouvelables est supposée se faire à consommation constante, croissante ou décroissante ?) mais les réponses sont probablement le reflet de "quelque chose" quand même.

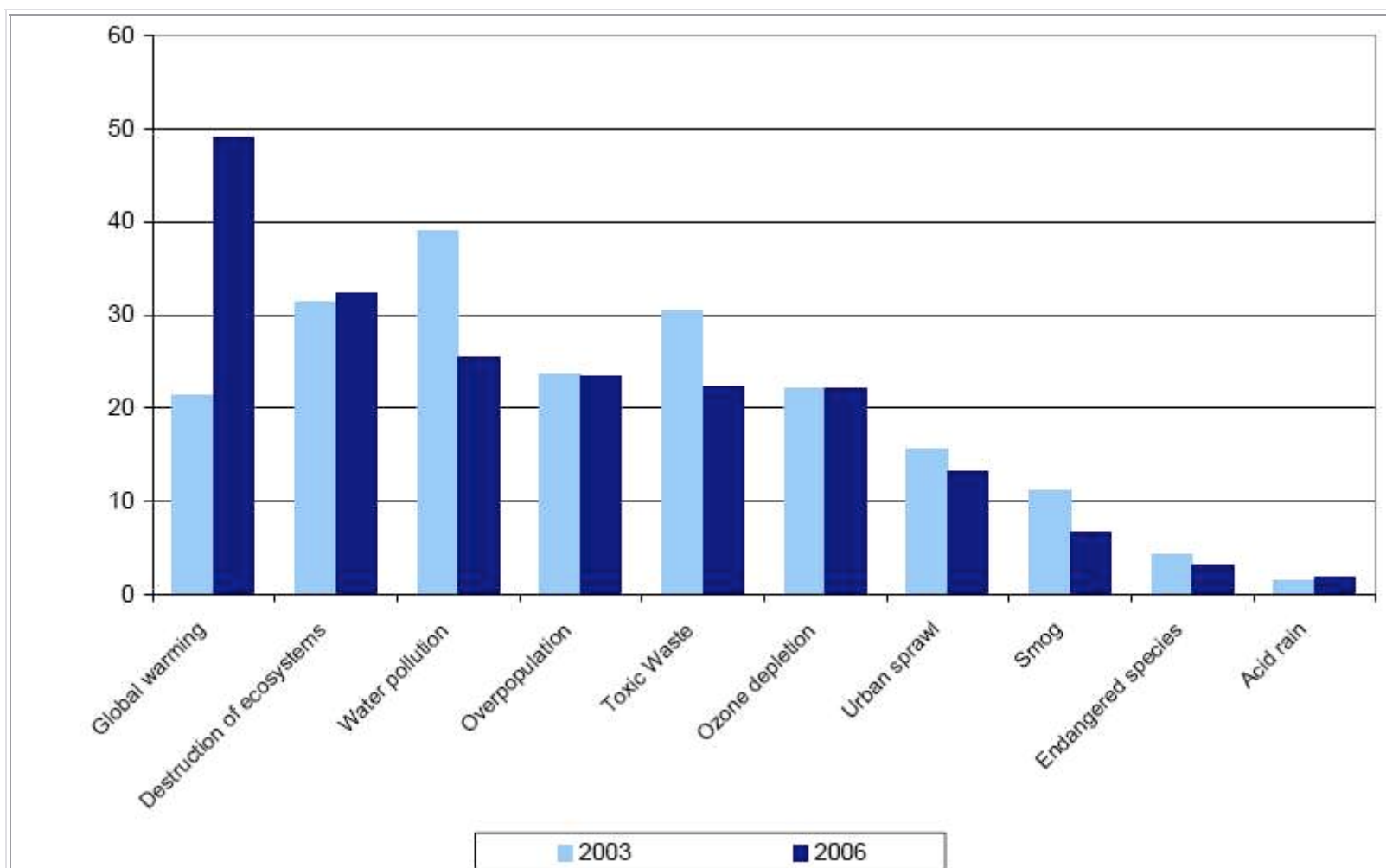
Pensez-vous que le gouvernement fédéral en fait assez pour s'occuper du problème du changement climatique et pour développer des sources d'énergie alternatives afin de diminuer notre dépendance au pétrole importé ?	% des réponses
Nettement moins que le nécessaire	45%
Un peu moins que le nécessaire	30%
Un peu plus que le nécessaire	5%
Beaucoup plus que le nécessaire	2%
Il fait le nécessaire	12%

Seriez vous pour ou contre une volonté plus affirmée du gouvernement fédéral de diminuer la pollution liée au réchauffement global, d'encourager de nouvelles approches pour promouvoir l'efficacité énergétique, et accélérer le développement des énergies renouvelables ?	% des réponses
Je suis fortement pour	48%
Je suis plutôt pour	35%
Je suis plutôt contre	7%
Je suis fortement contre	6%
Sans opinion	4%

Que pensez-vous de l'affirmation suivante : "développer des sources alternatives d'énergie et diminuer la dépendance des Etats Unis au pétrole importé devrait être la première priorité de Bush pour le reste de ses années aux pouvoirs."	% des réponses
Je suis tout à fait d'accord	45%
Je suis plutôt d'accord	32%
Je suis plutôt en désaccord	11%

Je suis tout à fait en désaccord	9%
Sans opinion	3%

Enfin en novembre 2006 le MIT a demandé aux Américains quel était pour eux le premier problème d'environnement, et, surprise !, c'est le changement climatique qui arrive en tête.

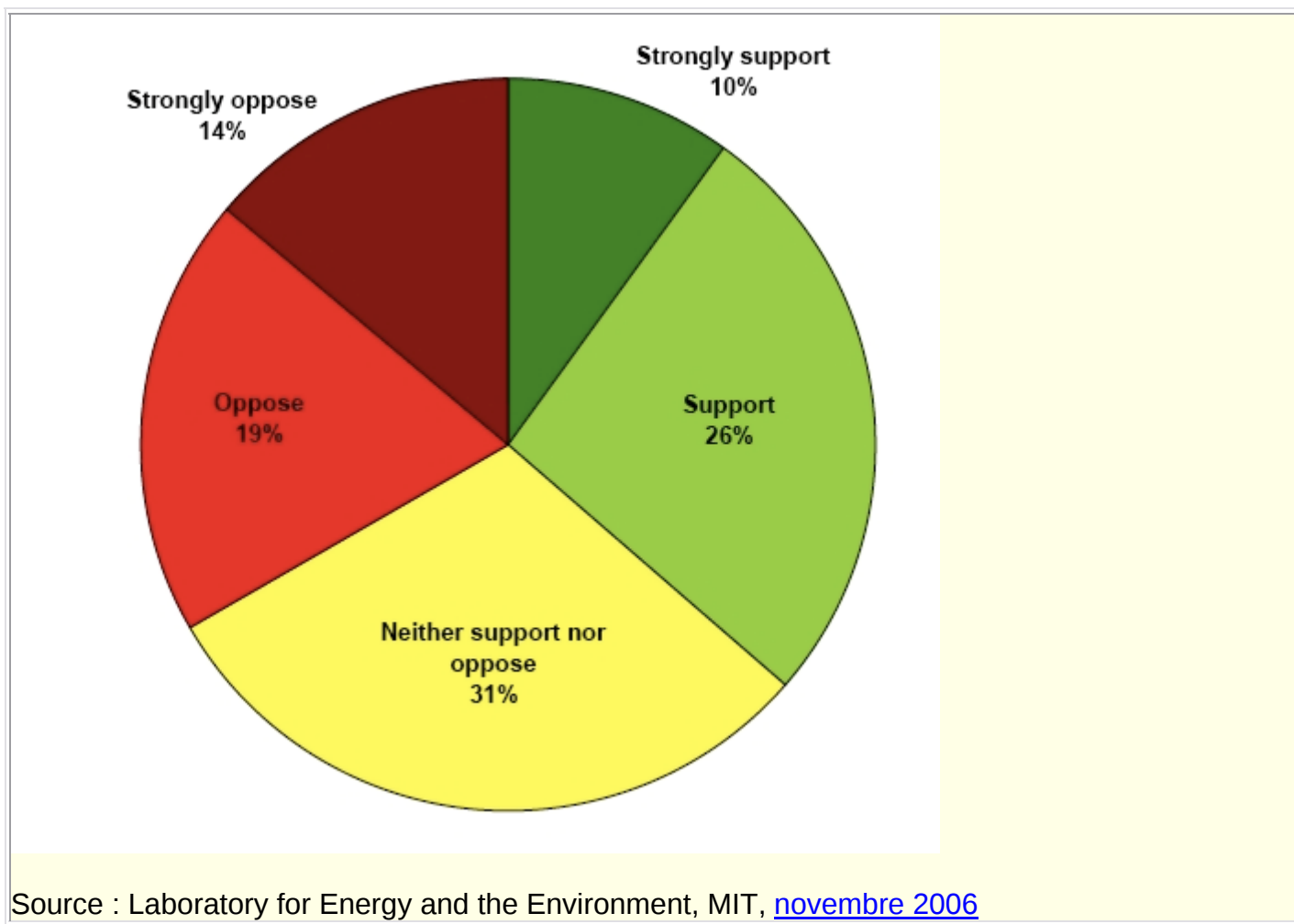


Question posée : Quel est le plus important problème d'environnement pour les USA aujourd'hui ? Notez la hausse spectaculaire en 3 ans des Américains qui répondent "le changement climatique".

Source : Laboratory for Energy and the Environment, MIT, [novembre 2006](#)

Et voici maintenant le clou du spectacle : les USA seraient le pays des anti-taxes ? Voire...

Question posée : Une proposition est actuellement déposée devant le Congrès qui propose : de diminuer les impôts d'une famille typique de 1000 \$, d'augmenter la facture mensuelle d'électricité de 25\$ [NDR : ca fait 300 \$ de plus par an], de taxer l'essence de 60 cents par gallon [NDR : ca fait 600 \$ de plus par véhicule et par an en chiffres ronds], et tout cela pour baisser les émissions de 50%. Etes vous pour ou contre ?



Le résultat ci-dessus est parfaitement clair : un tiers des Américains sont favorable à un tel transfert fiscal, un tiers y sont défavorables, et un tiers ne savent pas. En d'autres termes, si cette loi était votée, il n'y aurait qu'un tiers d'opposants déclarés. Pour un nouvel impôt, ce n'est pas beaucoup !

Bref, en 3 ans les Américains sont devenus "inquiets" sur ce sujet à peu près à l'égal des Français ; que ce soit il y a 4 ans ou maintenant, seuls 20% à 25% des Américains approuvent franchement l'action de George W. Bush en la matière, les autres étant tièdes ou franchement opposés ; ils sont peut-être plus favorables aux taxes que nous !

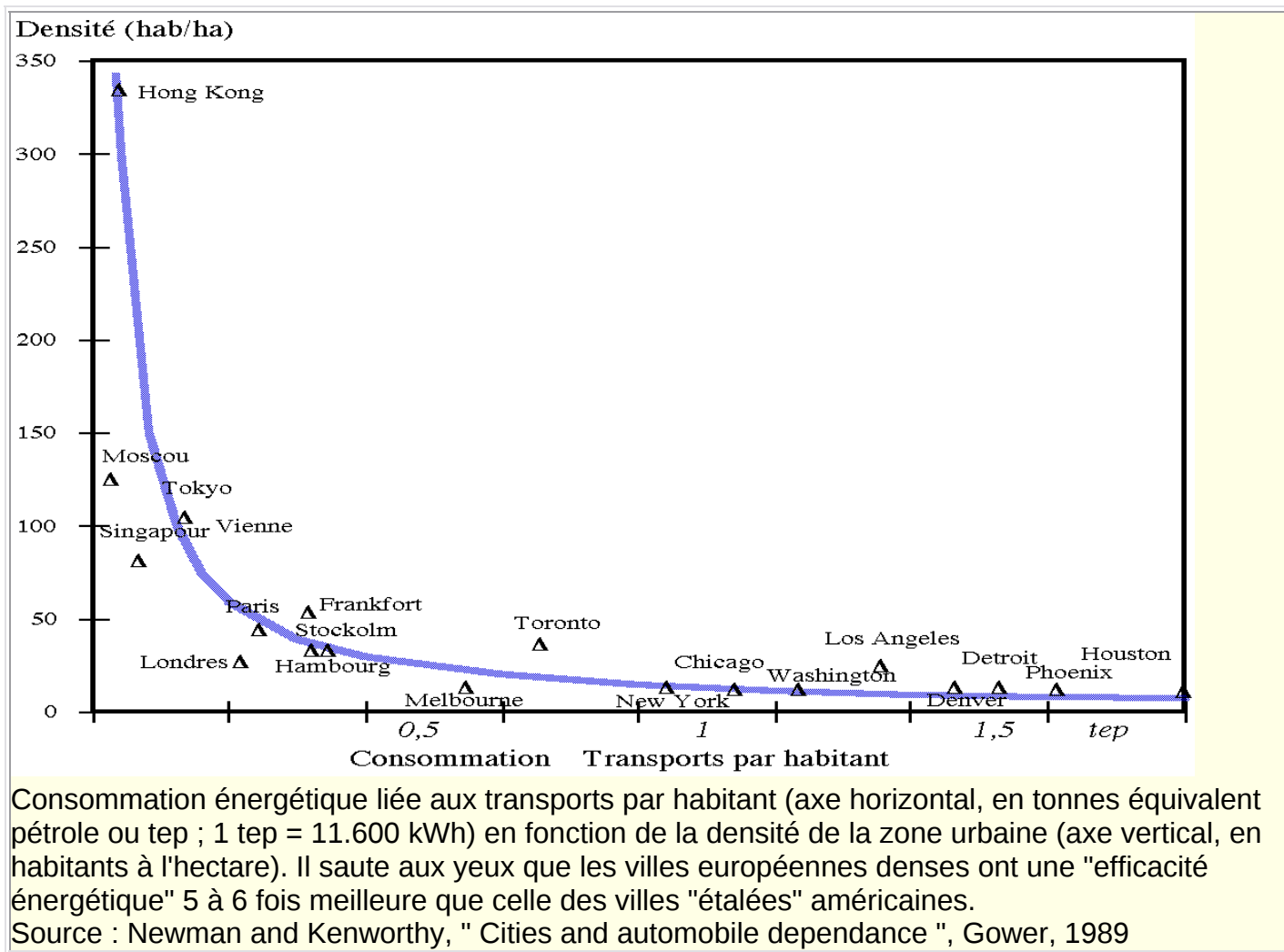
Dès lors, est-il juste d'assimiler l'ensemble d'un pays à son dirigeant du moment, qui manifestement n'est pas en phase avec son opinion sur ce point ?

Les Français récoltent-ils aujourd'hui les fruits d'un "effort climatique" soutenu ?

Après la mauvaise volonté éventuelle (qui n'est pas plus caractérisée que chez nous si nous nous basons sur les déclarations d'intention de la population américaine), un deuxième élément pourrait nous permettre de nous poser en donneurs de leçons : que nous récoltions dès aujourd'hui les fruits d'un effort soutenu pour réduire nos émissions.

Or, si nous avons effectivement des émissions par habitant qui sont quasiment 3 fois moindres que celles des Américains, il s'avère en fait que cela doit bien peu à notre "conscience du changement climatique", et aux efforts considérables que nous aurions effectués de manière volontaire, et beaucoup à l'histoire. La relative faiblesse de nos émissions par habitant constitue en effet le "produit dérivé" d'un certain nombre d'initiatives qui n'ont pas été prises à cause du changement climatique, et dont certaines sont fort anciennes ! :

► les villes européennes - donc françaises - ont été construites pour l'essentiel à une époque où les seules énergies disponibles étaient les énergies renouvelables (la traction animale, le bois, le soleil.....), et nos ancêtres ont donc fait des cités denses, où les déplacements étaient courts, donc économes en énergie. Au contraire, l'essentiel des villes américaines ont été construites après la découverte du charbon et du pétrole, et la limitation des déplacements n'a pas été un élément pris en compte. De ce fait leur urbanisme a été plus "étalé", ce qui allonge les parcours et rend les transports en commun moins envisageables, toutes choses qui font rapidement grimper la consommation d'énergie, donc les émissions des transports. Mais pouvons nous nous prévaloir, comme une action de lutte contre le changement climatique, du fait d'hériter de villes construites il y a des siècles ?



➤ la France n'a plus de charbon, et surtout n'a jamais produit de pétrole ou de gaz en quantités significatives comparées à sa consommation (en 2002 la France a produit moins de 2% du pétrole et moins de 1% du gaz qu'elle a consommé). Notre consommation étant importée en quasi-totalité, les pouvoirs publics ont toujours pris des mesures qui conduisent de fait à en

économiser l'usage, comme par exemple les taxes sur les carburants. Là aussi, la raison première des économies n'avait rien à voir avec la question climatique : il s'agissait surtout de ne pas alourdir la facture pétrolière.

A l'opposé, les USA ont longtemps eu la place de premier producteur de pétrole au monde (c'est fini maintenant), et sont assis sur les premières réserves de charbon de la planète. Ils n'ont donc jamais considéré le pétrole ou le charbon comme des ressources rares, et n'ont jamais éprouvé le sentiment d'en limiter l'usage. Nous ne pouvons pas leur reprocher de ne pas avoir bâti des villes économes à une époque où les limites de la planète ne se posaient pas pour beaucoup de monde...

➤ le programme électronucléaire français, qui nous permet l'[économie de 20 à 40% d'émissions](#) à consommation d'énergie totale comparable, a été décidé dans les années 70, soit bien avant la "montée en puissance" de la question climatique à la fin des années 1980. C'est certes une [excellente chose à mon sens d'avoir fait ce programme](#), mais nous pouvons difficilement le présenter comme une action volontaire de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre ! Nous "héritons" là aussi d'une vertu qui n'était pas dans le cahier des charges de l'époque ; à ce moment c'était l'indépendance énergétique qui était en jeu. Les pays qui n'avaient pas de problème d'indépendance énergétique, comme les USA, et ont eu recours au charbon, au fioul ou au gaz pour leur production électrique, ont aujourd'hui des émissions nationales 20 à 40% supérieures à celles de la France pour une même consommation électrique. Mais encore une fois l'enjeu en France était l'économie de pétrole, de gaz et de charbon, pas la baisse des émissions !

Les dirigeants Français peuvent-ils donner des leçons à ceux des Etats-Unis ?

La [Convention des Nations Unies sur le changement climatique](#) (et dont le protocole de Kyoto est un "appendice") a été signée en 1992 puis ratifiée par la France, comme par tous les pays du monde. Cette convention a pour objectif ultime de "stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique" (anthropique signifie "due à l'homme").

Cette formulation [ne fournit pas la valeur des concentrations maximales en gaz à effet de serre dans l'atmosphère qu'il faudrait ne pas dépasser](#), mais enfin il y a au moins une chose que cette formulation contient implicitement : il faudra que, "un jour", ces concentrations cessent d'augmenter (une augmentation indéfinie sera clairement dangereuse à un moment ou à un autre !), et pour cela [TOUS les pays industrialisés, France compris, devront baisser leurs émissions de CO₂ de 75% à 92%](#).

Si les Etats-Unis devront fournir un effort relatif supérieur au nôtre, la France devra néanmoins [diviser ses émissions de CO₂ par 4 pour se conformer à cet objectif](#), ce qui est loin d'être une plaisanterie, et justifiera aussi chez nous des réorientations majeures. Or, si nous oublions les beaux discours tenus par nos dirigeants et regardons les faits, nous constatons que non seulement ces réorientations n'ont pas été décidées, mais que c'est souvent l'inverse qui est fait, et ce quelle que soit la couleur politique du pouvoir en place :

➤ le linéaire autoroutier, qui était de 6.680 km en 1990, soit 2 ans avant Rio, est passé à 9.300 km en 2000, soit 40% d'augmentation depuis les beaux discours, et augmente actuellement de 200 à 300 km par an, malgré la signature de Kyoto. Les annonces du gouvernement en 2003 comprennent 12 projets autoroutiers ou routiers "importants" (genre 2x2 voies) pour le futur. Il serait étonnant de construire ces infrastructures pour ne pas s'en servir, or s'en servir fera augmenter le trafic donc les émissions ; il est donc parfaitement incohérent de construire ce genre de chose et de souhaiter faire baisser le trafic en même temps....

➤ en 2001, la TIPP a baissé, ainsi que les taxes sur le fioul domestique ([le chauffage est un poste très important des émissions](#)), sur le carburant agricole, et un dégrèvement sur les carburants pour le transport routier,

➤ en 2001 toujours, la vignette automobile a été supprimée,

➤ en 1997, le gouvernement a décidé du doublement des pistes de Roissy (le même gouvernement souhaitait en fait la création d'un [3^e aéroport parisien](#)), et en 2003 le gouvernement a considéré comme souhaitable, même s'il n'a plus d'argent à y mettre, la création de l'aéroport de ND des Landes dans l'Ouest et la réalisation sous une autre forme d'une nouvelle infrastructure aéroportuaire pour desservir Paris,

➤ le parc de grandes surfaces, qui sont des aspirateurs à voitures situées en périphérie de ville (à chiffre d'affaires équivalent, les grandes surfaces induisent 2 à 10 fois plus de transports - pour les clients et les marchandises - que le commerce de centre ville),

et induisent aussi une consommation d'énergie accrue - par rapport au petit commerce et aux marchés - pour le chauffage du magasin et la fabrication des produits vendus, a continué à croître, avec la bénédiction des pouvoirs publics :

Autorisations de mise en service de grandes surfaces de 1998 à 2001, en mètres carrés. Source : Ministère de l'équipement, 2003				
Année de l'autorisation	1998	1999	2000	2001
Hypermarchés	157 915	196 684	216 768	171 809
Supermarchés	235 814	368 891	382 186	323 738
Equipement de la maison	223 152	343 126	416 901	396 590
Bricolage	425 916	564 563	566 765	509 553
Jardinerie	308 110	446 726	484 968	386 976
Equipement de la personne	75 453	153 946	197 042	183 297
Loisirs, culture, sports	165 882	253 067	301 825	320 502
autres	261 941	375 556	463 594	380 716
total	1 856 181	2 704 558	3 032 049	2 675 182

➤l'appel à la croissance de la consommation de produits manufacturés est omniprésent dans la bouche de nos dirigeants...

Les citoyens Français peuvent-ils donner des leçons à ceux des Etats-Unis ?

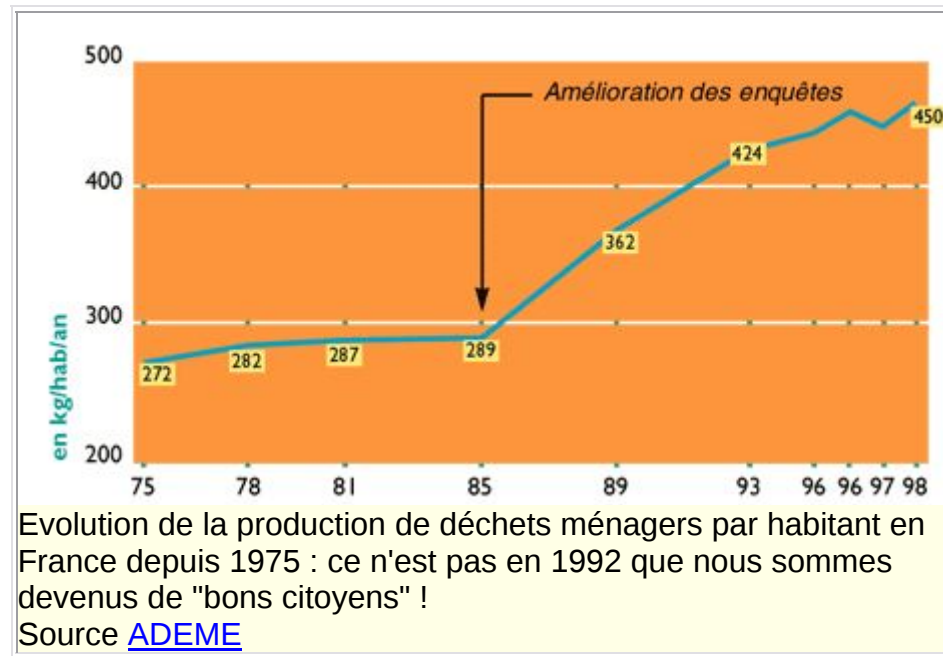
Admettons que, comme aux Etats-Unis, nos dirigeants prennent des décisions qui ne soient pas conformes à ce que nous souhaitons vraiment, et que nous soyons en proie à une impérieuse envie de "déconsommer" (je pense que le lecteur acceptera volontiers qu'en fait ce n'est pas du tout le cas !). Pour nous poser néanmoins en donneur de leçons, il conviendrait, alors, que nous soyons en train de [suivre "la bonne voie" au niveau individuel](#). Or si nous regardons ce que nous faisons concrètement

quand nous prenons des décisions d'achat ou de consommation qui ont une incidence sur les émissions de gaz à effet de serre, voici ce que cela donne :

➤ depuis 1992 nous avons continué d'augmenter la taille de nos logements, qu'ensuite il faut bien chauffer l'hiver (et de plus en plus climatiser l'été), avec des émissions de gaz à effet de serre à la clé : **la surface habitable par personne est passée de 34 à 37 m² (soit 10% d'augmentation) entre 1992 et 2002**, et nous continuons d'augmenter le parc de logements de quelques centaines de milliers d'unités tous les ans (qu'il faudra aussi bien chauffer etc). De ce fait, malgré une réglementation thermique de plus en plus "dure" pour les logements neufs, et des températures hivernales en hausse sur les dernières décennies, la quantité totale d'énergie de chauffage est restée constante (alors qu'il faudrait la diviser par 2 à 4).

➤ nous avons pris de plus en plus l'avion : **le trafic aérien en France a augmenté de 67% pendant la décennie 1992-2001**. Le transport aérien est un contributeur très important aux émissions de gaz à effet de serre : les avions qui décollent d'un aéroport français engendrent (sur toute la durée du vol) des émissions équivalentes à celles de la moitié des automobiles françaises. Une partie de cette hausse du trafic aérien est certes due aux étrangers venant en France, mais par ailleurs nous avons aussi fait tout ce que nous pouvions pour entretenir ce flux touristique aéroporté !

➤ nous avons continué à jeter toujours plus de déchets ménagers : +10% en 10 ans.



Or ces déchets représentent autant de matériaux qu'il a fallu produire, ce qui a conduit à [de grandes émissions de gaz à effet de serre](#), et autant de déchets qu'il faudra gérer ensuite, ce qui conduira à des émissions supplémentaires (même avec le tri sélectif ou le recyclage), quoiqu'inférieures à celles liées à la fabrication de ce qui est jeté.

➤ nous avons - comme consommateurs, personne ne nous y oblige ! - continué d'acheter des voitures de plus en plus lourdes,

Masse à vide des voitures neuves vendues en France	1990	2000	augmentation 2000/1990
Essence	904	1029	14%
Diesel	1053	1260	20%

Ensemble	953	1142	20%
-----------------	-----	------	-----

Source Observatoire de l'Energie, 2002

➤de plus en plus puissantes,

Puissance des voitures neuves (kW) vendues en France	1990	2000	augmentation 2000/1990
Essence	56	64,1	14%
Diesel	53,2	69,5	31%
Ensemble	55,1	66,7	21%

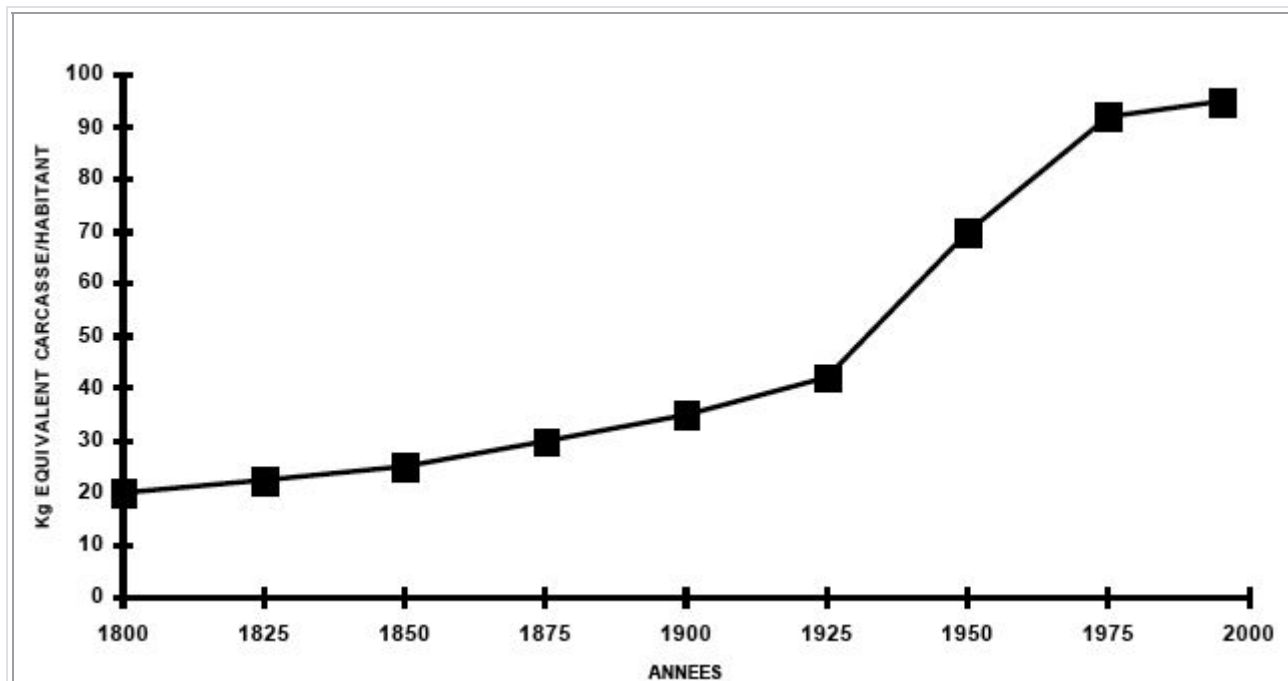
Source Observatoire de l'Energie, 2002

➤et auxquelles nous faisons faire de plus en plus de kilomètres par an.

Parcours annuel moyen par voiture (km)	1990	2000
Tous carburants	13 760	14 031

Source Observatoire de l'Energie, 2002

➤nous avons continué à manger beaucoup de viande, alors que [la production de cette dernière engendre autant d'émissions que les voitures particulières en France](#),



Estimation de la consommation de viande par habitant en France depuis 1800.

Source : Bernard Sauvont, [INRA](#)

➤ et je pourrais reproduire les courbes des achats de frigos, de plats surgelés, de cadeaux à Noël, d'achats de fruits exotiques (transportés par avion) ou de fruits hors saison, de viande, etc ; toutes ces courbes ayant leur contrepartie en termes de consommation d'énergie fossile et d'émissions de gaz à effet de serre. En clair, nous ne trouverions pas beaucoup d'exemples pour illustrer un éventuel désir de vertu des Français !

En guise de conclusion

Il me semble donc que, avant de donner des leçons de morale aux Américains, nous devrions balayer un peu devant notre porte : certes, nous partons de plus bas, et, certes, nos amis Yankees ont des efforts autrement plus considérables que nous à faire [si la planète doit diviser ses émissions par deux de manière volontaire](#), mais ces dernières années nous n'avons pas plus pris le tournant de la décroissance volontaire des émissions qu'eux.

Il ne s'agit pas, bien évidemment, de considérer que les Américains ne doivent rien faire parce que nous sommes incapables de montrer le chemin : ils seraient bien inspirés de s'y mettre avec un peu plus d'ardeur si NOUS voulons éviter [l'augmentation des conséquences désagréables dans notre pays](#). Mais placer le débat sur le terrain de la morale ne fait pas avancer les choses, car notre comportement ne nous donne aucune légitimité pour ce faire.

Nos émissions comparativement plus basses sont le fruit de la géographie, de la géologie, et surtout de plusieurs siècles d'histoire ; le leur reprocher moralement n'a pas plus de sens que de reprocher à mes concitoyens de parler français ou d'aimer le fromage. Il faut souhaiter que les Américains diminuent aussi vite que possible leurs émissions, mais notre comportement récent ne nous donne hélas aucune légitimité pour le leur demander au nom de la morale.

Qui devrait réduire en premier ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Pour le moment, les [émissions par tête](#) sont environ 10 fois moindres dans les pays en voie de développement que dans les pays développés (environ 0,4 tonne de carbone par habitant et par an contre 3 dans les pays de l'OCDE). On serait donc tenté de dire que nous devons commencer.

Mais une [prolongation tendancielle](#) de la situation actuelle donne la Chine comme plus gros émetteur de gaz à effet de serre dans quelques décennies, devant les USA. Certains pays occidentaux (dont les USA, responsables à eux seuls de 25% des émissions) sont donc tentés de dire que les réductions des pays occidentaux ne peuvent démarrer que lorsque les pays en voie de développement s'engageront dès maintenant à diminuer eux aussi leurs émissions dans un avenir qu'il importe de fixer (ce qui n'est pas le cas).

Il est cependant évident que le monde "développé" devra donner l'exemple d'une réduction de grande ampleur de sa consommation énergétique, et le donner rapidement, compte tenu des délais de mise en oeuvre : les pays dits "en voie de développement" n'ont **que notre modèle à suivre** :

- Ce sont les pays développés qui sont leur référence culturelle (voir les parts de marché d'Hollywood...),
- Ce sont les pays développés qui leur apprennent l'usage des technologies occidentales (énergivores pour le moment),
- Ce sont notamment les pays développés qui leur vendent voitures et Airbus, qui leur construisent leurs aéroports et une partie de leurs autoroutes, etc
- Ce sont les pays développés qui leur demandent - via les institutions financières internationales - la croissance économique qui aujourd'hui ne peut être basée que sur la [croissance de la consommation énergétique fossile](#), (mais [cela ne durera pas](#), hélas !)
- etc.

Il est donc **totalelement illusoire** (et illogique) de vouloir changer leur trajectoire sans changer nous-mêmes. On pourrait résumer la chose comme suit : demande-t-on à son voisin de ne pas faire de bruit quand son propre chien aboie toute la nuit ?

C'est donc bien les pays développés qui tiennent le manche dans cette affaire.

Lutter contre l'effet de serre et économiser l'énergie : quel est l'impact des divers actes individuels ?

juin 2000 - dernière modif : septembre 2003

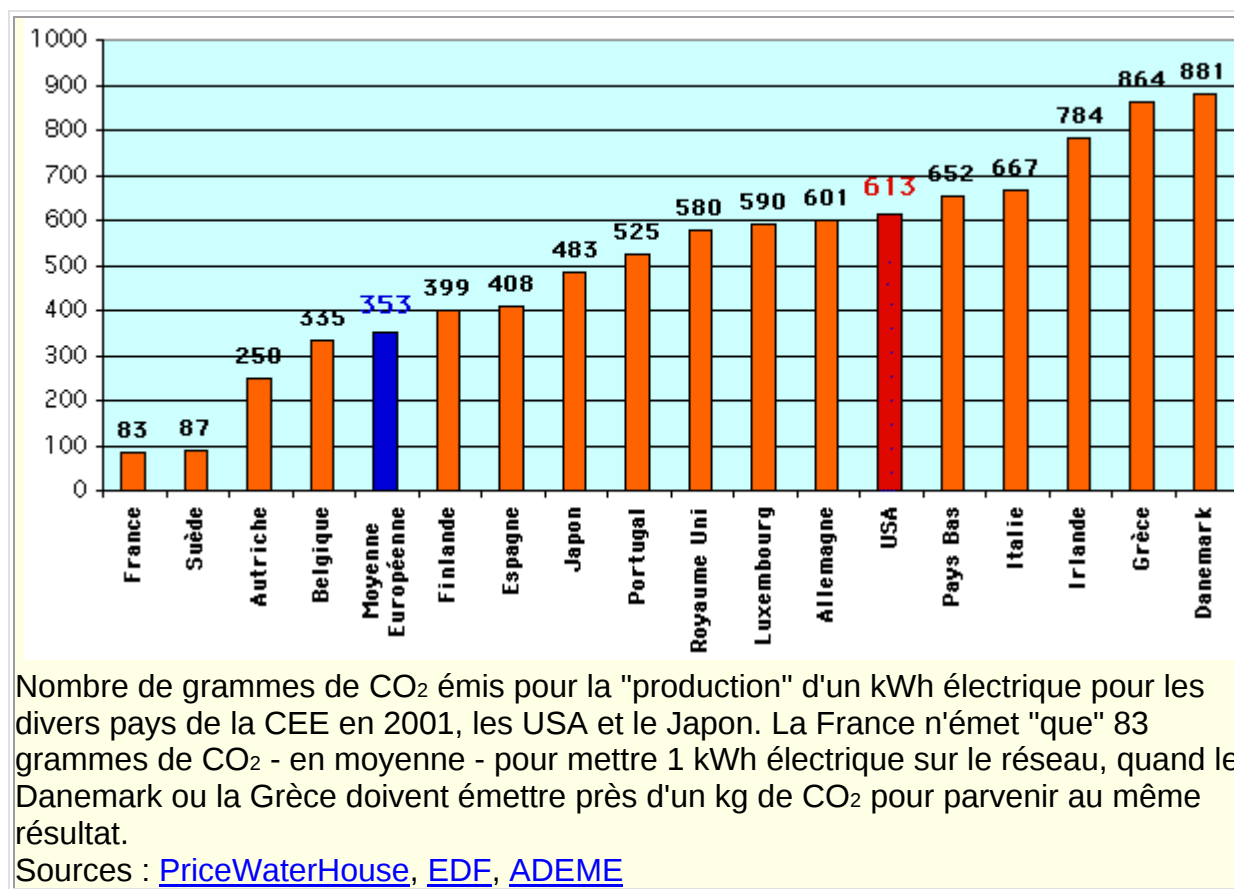
Site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

La presse grand public affecte rarement des ordres de grandeur aux comportements "politiquement corrects" en matière de lutte contre [le changement climatique](#) : quelle économie est engendrée lorsque l'on remplace une lampe classique par une lampe basse consommation, et surtout qu'est-ce que cela représente comparé à la [réduction ultime qu'il faudra parvenir à faire](#) ? J'ai donc trouvé intéressant de proposer mon propre inventaire, basé sur quelques ordres de grandeur faciles à calculer. J'ai classé les mesures par ordre de difficulté croissant quand au fait d'arriver "à s'y décider".

Pour chaque mesure j'ai indiqué l'efficacité avec un nombre de croix (+ à +++) et l'impact financier avec le nombre de dollars (\$\$\$ à \$\$\$); rouges quand ça coûte, vert quand on économise ; quand il n'y a rien c'est que c'est financièrement neutre ou incalculable).

Il est important de garder en mémoire quelques éléments importants :

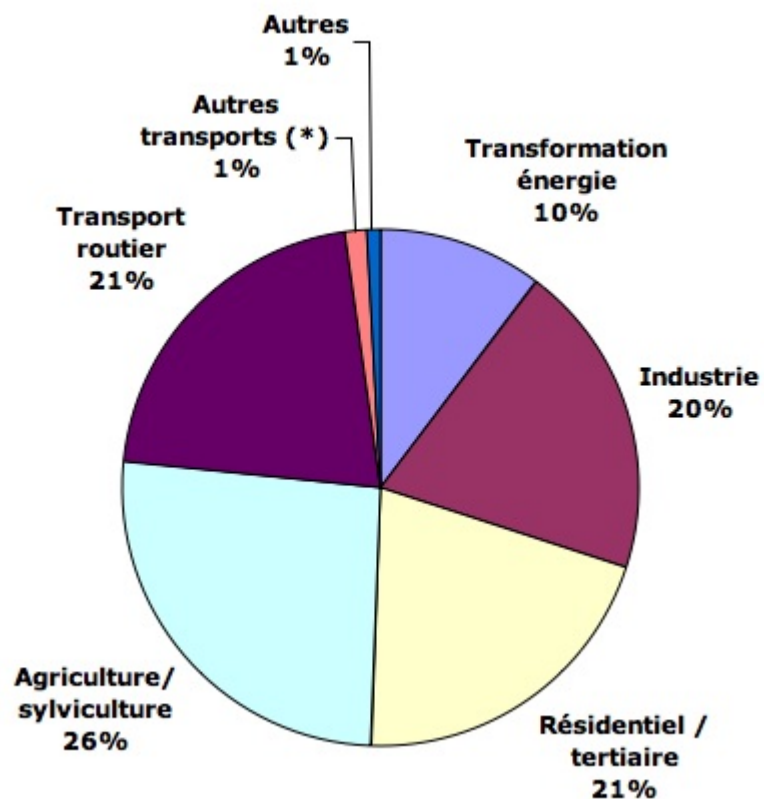
► en France la production d'électricité est faite pour l'essentiel avec des procédés qui n'émettent pas de CO₂ (nucléaire pour 80%, hydroélectricité pour 15%). De ce fait les émissions de CO₂ directement évitées par le biais des économies d'électricité sont modestes. Cela n'est pas le cas dans la majorité des pays européens, et encore moins aux Etats Unis



Aussi la hiérarchie qui suit n'est valable, outre pour la France, que pour la Suisse (non représentée sur le graphique ci-dessus mais qui est au même niveau que la France) et la Suède (ces trois pays produisent l'essentiel de leur électricité avec du nucléaire et des barrages). Pour tous les autres pays, l'économie d'électricité sera synonyme d'une économie importante d'émissions de gaz à effet de serre.

► un Français émet environ 2,2 tonnes équivalent carbone par an tous gaz à effet de serre confondus et en tenant compte des puits. Les gains estimés ci-dessous sont donc évalués à l'aune de cette émission moyenne.

► Enfin il est utile de conserver en mémoire la répartition par secteur des émissions de gaz à effet de serre en France (ci-dessous).



Répartition par secteur des émissions des 6 [gaz à effet de serre](#) en France en 2001. Source : [CITEPA](#), 2002

(*) le transport aérien ou maritime international (l'aérien est prépondérant) n'est pas pris en compte. Il ne s'agit que du transport non routier (ferroviaire, aérien, ce dernier étant prépondérant) domestique.

Enfin le secteur "transformation énergie" correspond pour moitié aux centrales électriques à charbon et pour moitié aux émissions des raffineries de pétrole.

Je n'ai pas mentionné des mesures dont l'impact est "dans l'épaisseur du trait" en France, par exemple.....[les ampoules basse consommation](#).

Enfin on constatera assez facilement que de faire attention à ses émissions de carbone signifie généralement :

- ▶ des économies d'énergie,
- ▶ des économies tout court ! En outre si le prix des hydrocarbures monte brusquement, ce qui est à peu près certain "un jour", moins on en consomme et moins on souffre...

Très facile

- Baisser la température l'hiver de 1°C dans les lieux chauffés. ++ \$

Référence : si on utilise 2.000 l de fioul pour chauffer une maison l'hiver, cela engendre 1,25 tonne équivalent carbone. Si l'on utilise du gaz naturel, pour une dépense énergétique équivalente on émet encore à peu près 1 tonne équivalent carbone.

Une baisse de 1°C fait économiser jusqu'à 10% de la consommation en énergie pour la chauffage (la moyenne est autour de 7%). Si vous vous chauffez au fuel et que vous consommez 2.000 l dans l'hiver, à 0,5 euro le litre, une baisse de consommation de 10% de fuel permet d'éviter l'émission de 125 kg d'équivalent carbone et fait économiser 100 euros.

➤ Utiliser le moins possible la climatisation en voiture ++ \$

Référence : si on utilise la climatisation dans une voiture, la consommation augmente de 20%.

Pour une utilisation annuelle de 15.000 km en cycle urbain dont le tiers avec climatisation, ne pas utiliser la climatisation représente une économie de 100 à 200 kg de carbone par an.

➤ Ne pas regarder la publicité (et surtout éviter que ses enfants la regardent !) + à +++ \$ à \$\$\$

Référence : si l'on réintègre les transports et le chauffage qui leur sont propres, l'industrie et les services (qui produisent les produits que nous achetons et les services que nous consommons) sont, en France, à l'origine de 50% des émissions de gaz à effet de serre.

Moins on consomme de produits manufacturés ou de voyages et plus on est vertueux sur le plan des émissions de gaz à effet de serre. Moins consommer est probablement plus facile si on ne regarde pas la publicité (c'est particulièrement vrai pour les enfants et les adolescents).

Facile

➤ Penser à la manière dont on va se déplacer avant de déménager ++++ \$\$

Référence : 15.000 km annuels en voiture en cycle urbain engendrent au minimum 1 tonne équivalent carbone (pour une petite voiture de 3 CV fiscaux).

Le transport est devenu la première source d'émissions de CO₂ en France (35 à 40% des émissions de ce seul [gaz à effet de serre](#) en réintégrant les émissions des raffineries, mais sans compter celles provenant de la fabrication des véhicules). Par ailleurs, il est aussi le premier ou le deuxième poste budgétaire des Français. Lorsque l'on déménage, éviter de se mettre dans une zone mal desservie par les transports en commun est être doublement vertueux :

- se déplacer moins en voiture permet de diminuer très fortement ses émissions de gaz à effet de serre (voir plus bas).
- on fait du bien à ses propres finances car la voiture coûte cher, et est susceptible de coûter de plus en plus cher sur le long terme, puisque les carburants ne sont pas inépuisables (et les [bio-carburants ont un potentiel très faible](#))

➤ Manger le moins de viande possible, et au sein de la viande, le moins de boeuf possible +++++
\$\$

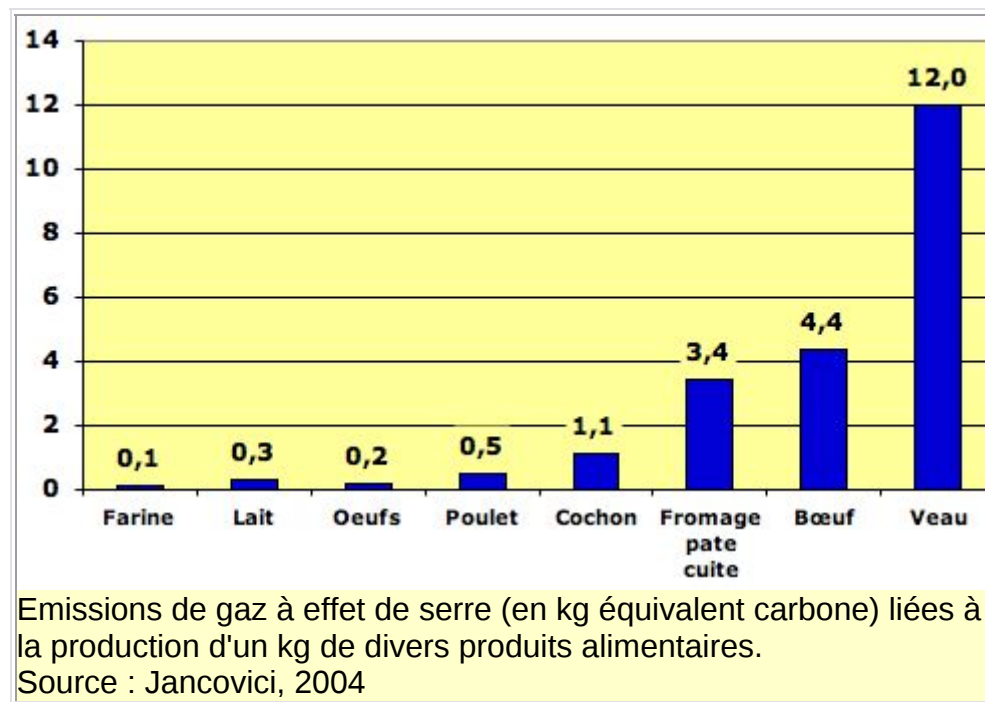
Référence : l'agriculture est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre en France, plus que l'industrie, et ce essentiellement à cause de l'élevage.

Si nous tenons compte de tous les processus annexes nécessaires (transports, fabrication des engrais, etc) le fait de manger est à l'origine de près d'un tiers des émissions en France !!

Produire un kilo de boeuf engendre de 50 à 100 fois plus d'émissions de gaz à effet de serre que de produire un kilo de blé, et représente l'équivalent de 60 km en voiture.

Manger beaucoup de viande engendre une agriculture intensive (car il faut produire beaucoup de végétaux pour nourrir les bêtes !), qui consomme directement ou indirectement de l'énergie fossile (pour la fabrication des engrais et des pesticides, et l'alimentation du tracteur), donc engendre des émissions de CO₂, et émet en outre d'autres gaz à effet de serre : en se décomposant, les engrais azotés émettent du protoxyde d'azote, 300 fois plus "réchauffant" que le CO₂, et par ailleurs les ruminants émettent du méthane, un gaz 23 fois plus "réchauffant" que le CO₂, à cause de la fermentation des plantes qu'ils mangent dans leur système digestif.

Il en résulte que produire un kg de boeuf conduit à l'émission de 4 kg équivalent carbone. Un kg de volaille ne "coûte" que de 0,5 à 1 kg équivalent carbone et le cochon un peu plus de 1. Tous ces chiffres ne sont valables que pour des produits "bruts", sans traitement derrière.



Supprimer 2 steacks par semaine (soit 300 g par semaine) induit, à la fin de l'année, environ 50 kg d'économies en équivalent carbone.

Dans une moindre mesure ce raisonnement est valable pour tout ce qui dérive du boeuf : veau (plus de 10 kg d'équivalent carbone par kg), lait & laitages, beurre, glaces, etc...

Sans parler d'être végétarien pour autant, il est assez facile (je l'ai fait) de diviser sa consommation de viande et de produits laitiers par 2, ce qui, outre des bénéfices importants pour les émissions de gaz à effet de serre, permet également les dividendes associés suivants :

- ▶ moindre pression sur les ressources en eau (il faut utiliser 500 l d'eau pour faire un kg de patates, mais de 20.000 à 100.000 litres pour faire un kg de boeuf avec des céréales venant de cultures irriguées),
- ▶ une meilleure santé, surtout si la diminution porte sur les produits "gras" (viande de boeuf grasse type viande à poêler, beurre, crèmes glacées, etc)
- ▶ diminution des rejets de pesticides et résidus d'engrais, puisque la nécessité d'une agriculture très productive (qui, encore une fois, sert essentiellement à nourrir l'élevage) disparaît,
- ▶ libération de surfaces affectables à d'autres usages (bois, cultures énergétiques à l'avenir).

▶ Acheter une voiture sans climatisation + \$

Référence : les gaz utilisés dans les circuits de climatisation (PFC, HCFC) sont de très puissants gaz à effet de serre (plusieurs milliers de fois le gaz carbonique) qui fuient toujours un peu (on estime les fuites à 33% de la charge initiale au bout de quelques années) et qui ne sont pas récupérés en fin de vie.

Les émissions provenant de ces fuites surviennent en plus de celles liées à la surconsommation de carburant quand la climatisation est en marche (voir plus haut).

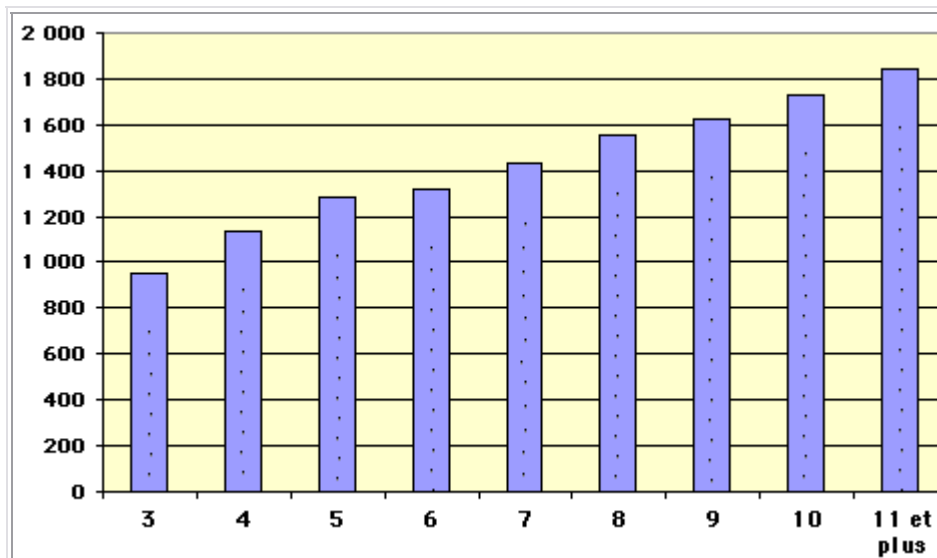
Ne pas acheter de voiture avec climatisation permet une double source d'économie :

- ▶ diminuer sa consommation en carburant,
- ▶ éviter des émissions d'halocarbures du même ordre de grandeur que le CO₂ dû à la surconsommation de carburant.

➤ Acheter une petite voiture +++ \$\$

Reference : pour 15.000 km annuels en voiture en cycle urbain on passe de 1 tonne à 2 tonnes équivalent carbone si on passe d'une toute petite voiture à une jeep 4x4 ou à une grosse berline (en moyenne, pour certains véhicules cela va encore au-delà).

Entre une petite voiture (Twingo, Smart) et une grosse Mercédès ou un gros 4x4, il y a une différence de consommation qui peut aller, selon le parcours (et en particulier la quantité d'embouteillages), du simple au quintuple (un gros 4x4, à froid, et avec des embouteillages, consomme 30 à 40 l aux 100 en ville ; les normes de consommation UTAC ne sont pas représentatives des conditions normales de circulation).



Kg équivalent carbone (axe vertical à gauche) émis en moyenne pour 15.000 km en cycle urbain selon la puissance administrative du véhicule (essence seulement, mais pour les diesel les ordres de grandeur sont les mêmes). Les émissions des raffineries et celles correspondant à la fabrication du véhicule sont comprises.

Source : Jancovici/[ADEME](#), 2003

Si l'on ne peut vraiment pas se passer de voiture, ne serait-ce qu'en changer pour prendre le plus petit modèle possible (quitte à faire voyager une partie de la famille en train pour les vacances) peut déjà faire économiser des quantités considérables de CO₂ : pour 15.000 km par an (distance moyenne parcourue par les automobiles en France), la différence Twingo/gros4x4 est au minimum de 1 tonne équivalent carbone par an !

En outre, les transports étant devenus le premier ou deuxième poste budgétaire des Français, une petite voiture avec une faible consommation a un impact certain (dans le sens des économies) sur les finances.

➤ Acheter une voiture hybride ++ \$\$

Référence : pour 15.000 km annuels en voiture en cycle urbain, passer à l'hybride peut faire économiser 30 à 50% de la consommation, soit 0,5 tonne d'équivalent carbone au moins.

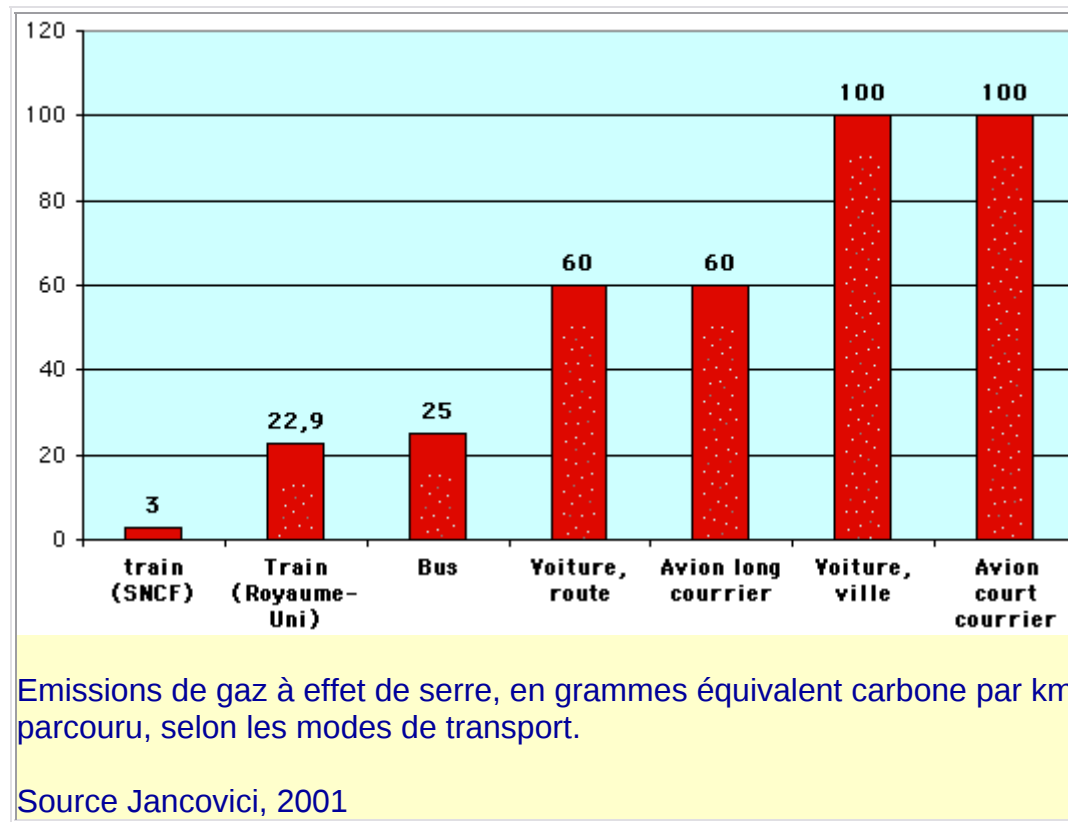
Les voitures hybrides possèdent un moteur plus efficace que le moteur d'une voiture "classique", et entre autres choses elles récupèrent l'énergie cinétique au moment du freinage pour la convertir en électricité, laquelle sert à alimenter la partie électrique du groupe propulseur. Ce système permet de gagner 30 à 50% de carburant. Sur une base de 15.000 km par an, cela permet d'économiser 700 à 1.000 litres d'essence par an, soit de l'ordre de 500 kg d'équivalent carbone.

Par contre l'achat d'une voiture électrique n'est pas nécessairement un bon moyen de lutter contre l'effet de serre partout. C'est [valable en France dans certaines limites](#), mais généralement pas à l'étranger.

Moyennement difficile

➤ Ne pas prendre l'avion +++ \$

Référence : un avion équivaut *grosso modo* à autant de petites voitures qu'il a de sièges passagers (même vides). Un voyageur en avion consomme à peu près ce qu'il aurait consommé en faisant le même kilométrage seul en petite voiture (environ 8 litres aux 100 km)



Lors d'un vol aller-retour Paris-Marseille, un passager émet environ 150 kg d'équivalent carbone en avion (en tenant compte de tous les gaz à effet de serre), contre 3 seulement en train.

Lors d'un aller retour Paris-New-York, un passager émet 900 kg d'équivalent carbone en moyenne (bien plus en classe affaires ou en première), soit un tiers de l'émission annuelle d'un Français tous gaz à effet de serre confondus. En 2 à 3 allers-retours Paris-USA on émet donc l'équivalent de ce qu'un Français émet par an (2,5 tonne d'équivalent carbone).

Etre vertueux sur le plan des émissions de gaz à effet de serre est en particulier incompatible avec le fait d'aller en vacances en Martinique l'hiver, avec la réunionite internationale, ou encore avec une retraite occupée à courir le monde (c'est dommage, mais c'est comme ça !).

➤ Ne pas acheter américain +++++

Référence : les émissions par habitant des USA sont deux fois plus importantes que celles des Européens. Cela se retrouve dans les émissions par unité de PNB, même en tenant compte de la différence de productivité entre les USA et l'Europe. Cela est dû au fait qu'aux Etats Unis tout est plus émetteur de gaz à effet de serre : les procédés industriels, le chauffage (maisons moins bien isolées), la production d'électricité est bien plus "riche" en CO₂ à cause du charbon (voir graphique du haut de cette page), les transports (distances plus longues et voitures plus grosses ; recours à l'avion plus fréquent), etc.

Voilà qui n'est pas du tout politiquement correct, mais tant pis ! Les chiffres sont ce qu'ils sont.... L'économie américaine étant presque deux fois plus riche en émissions de gaz à effet de serre que l'économie européenne, et presque trois fois plus que l'économie française, cela signifie qu'à chaque fois que l'on achète un produit fait aux USA plutôt qu'un produit fait en France, on double les émissions engendrées par la production du produit en question.

Acheter européen en général, et français, suisse ou suédois en particulier, est un début très efficace de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre.

En outre, les USA étant beaucoup plus sensibles à la tenue de leur commerce extérieur qu'aux discours politiques, "voter avec son portefeuille" (ou avec ses pieds) est un moyen bien plus efficace que n'importe quel autre pour peser sur l'orientation de la politique américaine (les villipender dans les journaux ne doit pas beaucoup les ennuyer tant que nous continuons à acheter leurs ordinateurs et à visiter Disneyland !).

Cela signifie que pour la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre il vaut mieux (quelques exemples, mais la liste est longue...) :

- ▶ investir à la bourse de Paris plutôt qu'à celle de New-York,
- ▶ voir "The Full Monty" plutôt que le dernier Bruce Willis,
- ▶ acheter Adidas plutôt que Nike,
- ▶ ne pas renouveler son équipement informatique trop souvent,
- ▶ et regarder attentivement le "made in" sur l'étiquette !

➤ Baisser la température au maximum dans son lieu d'habitation +++ \$\$

Référence : si on utilise 2.000 l de fioul l'hiver, gagner 30% représente 0,5 tonne équivalent carbone.

En baissant de quelques degrés (passer de 22 à 19 °C par exemple) la température des pièces, on peut économiser jusqu'à 30 ou 40% en chauffage. La fabrication des pulls et couvertures qui remplaceront une température élevée est négligeable au point de vue des émissions en regard de ce que l'on gagne.

➤ S'organiser avec des collègues de travail pour partager les voitures pour le déplacement domicile-travail + \$

Référence : 5.000 km annuels en voiture en cycle urbain (soit une distance domicile travail de 12 km environ) engendrent au minimum 0,3 tonne équivalent carbone par an (et généralement plus près de 0,5). En augmentant le nombre de passagers, on divise ce total par autant de personnes transportées.

Pour un déplacement domicile-travail de 30 km aller-retour en zone urbaine, cela permet économiser 0,20 tonne de carbone par personne et par an pour un partage à 2, et 0,35 tonne par personne pour un partage à 3.

➤ Isoler thermiquement sa maison du mieux possible +++ \$

Référence : si on utilise 2000 l de fioul l'hiver, gagner 50% représente 0,8 tonne de carbone.

Une bonne isolation thermique peut permettre de diminuer fortement ses émissions liées au chauffage. Entre un logement bien isolé et un logement mal isolé la dépense énergétique de chauffage, à température intérieure identique, varie du simple au double. Couplé avec le fait de mettre le thermostat le plus bas possible (19 °C sont parfaitement possibles) cela peut envisager de diminuer sa consommation de 70% (pour les logements anciens ; un ingénieur spécialisé de mes connaissances avance même 90% en combinant solaire passif, isolation et régulation de la température).

Dans l'exemple où l'on consommait 2000 l de fuel cela permet une réduction de 0,8 tonne d'équivalent carbone par an.

➤ Faire le plus possible ses courses chez les commerçants de proximité, y aller de préférence à pied ou à vélo ++ \$/\$

Référence : faire ses courses en centre ville divise par deux la "dépende transport" de la collectivité

Une étude de l'[INRETS](#) a montré que, pour un chiffre d'affaires équivalent, les hypermarchés de périphérie engendraient une dépense énergétique deux fois supérieure à celle des supermarchés de centre ville (et deux fois moins riches en emploi ; autrement dit la création d'un emploi dans la très grande distribution tue deux emplois dans le commerce de proximité). L'étude n'a pas été faite avec le commerce de proximité, mais le résultat est vraisemblablement le même, voire encore plus favorable. D'autres études dont j'ai eu connaissance donnent des résultats qualitativement convergents (voire encore plus défavorables aux très grandes surfaces).

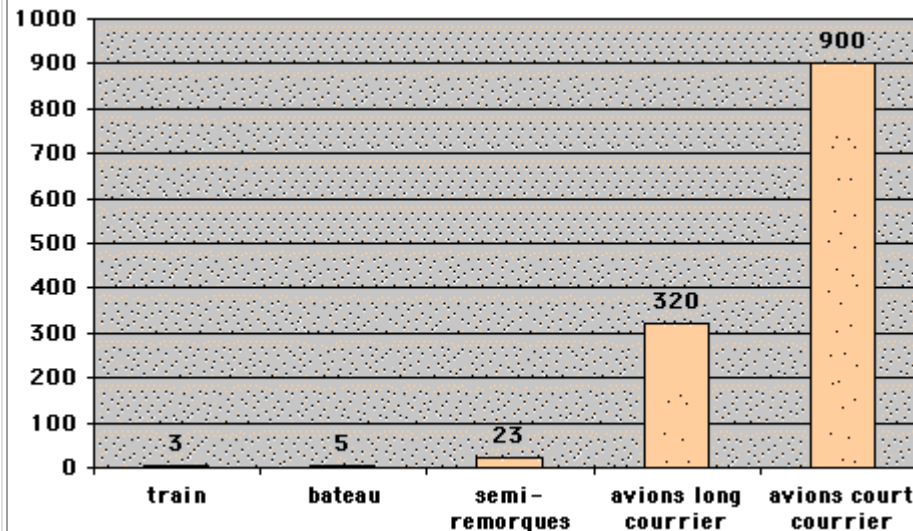
Cette "vertu" du commerce de proximité provient essentiellement de la raison suivante : le déplacement des clients est plus court lorsque l'on va en centre ville, et une partie des déplacements s'effectue à pieds, alors que pour un hypermarché la voiture est obligatoire

e. Aller près de chez soi diminuant la dépense transport, il est difficile de dire quel est l'impact financier d'un tel choix. Si cela permet d'éviter de s'acheter un deuxième véhicule, le gain financier est évident. Si cela permet d'éviter d'acheter à l'hypermarché des choses dont on n'a pas besoin (et, aux dires de certaines mères, la liste peut être très longue...) le gain financier est aussi potentiellement important.

➤ Ne pas se faire livrer les choses achetées par correspondance en 24H chrono + \$

Référence : sur 1.000 km, 1 tonne de fret fait presque 1.000

kg de carbone en avion court courrier, 25 kg en gros camion,
3 kg en train.



Emissions de gaz à effet de serre par tonne.km; selon le mode de transport.
Source Jancovici/[ADEME](#), 2003

Le fait de se faire livrer rapidement implique le recours à l'avion pour les grandes distances (qui est gourmand en carburant) et interdit l'usage du train (les manoeuvres impliquent un délai) pour les distances plus courtes, sans compter que tout le monde n'habite pas à côté d'une gare.

Le raccourcissement des chaînes logistiques est fortement responsable du bond du parc de camions ; aux USA où le mouvement a été initié avant la France les immatriculations de camions sont passées 2,5 millions à 7,2 millions par an de 1980 à 1997 !!
(source [Comité Français des Constructeurs d'Automobiles](#))

➤ Boire l'eau du robinet + \$

Cela évite de [fabriquer puis de jeter des bouteilles plastique](#) ; cela évite de transporter de l'eau par camion d'un bout à l'autre de la France (le transport local par tuyau est bien moins gourmand en énergie), cela coûte moins cher.

➤ Manger des produits de saison et cultivés ou élevés localement ++ \$

Manger des cerises en hiver, de l'agneau de Nouvelle Zélande, des tomates au mois de mars, ou des mangues toute l'année, induit une quadruple dépense énergétique qui conduit à des émissions de gaz à effet de serre :

- ▶ la culture sous serres chauffées (au fuel) pour les produits tels que tomates, fraises, etc, en hiver (et même certaines salades...),
- ▶ le transport sur une distance plus ou moins longue pour tout ce qui est produit à l'étranger,
- ▶ la congélation dans certains cas, or la plupart des systèmes de réfrigération fuient un peu et les fluides réfrigérants sont en général des halocarbures, qui sont des [gaz à effet de serre extrêmement puissants](#), sans parler du fait que de congeler les produits demande de l'énergie donc engendre des émissions,
- ▶ une bonne partie de ce qui arrive de loin est emballé (plus que les tomates de saison achetées au marché au maraîcher du coin), ce qui engendre [une dépense énergétique et la mise au rebut de matériaux de base](#).

Difficile

➤Prendre les transports en commun plutôt que la voiture pour aller au travail ++/+++ \$\$\$

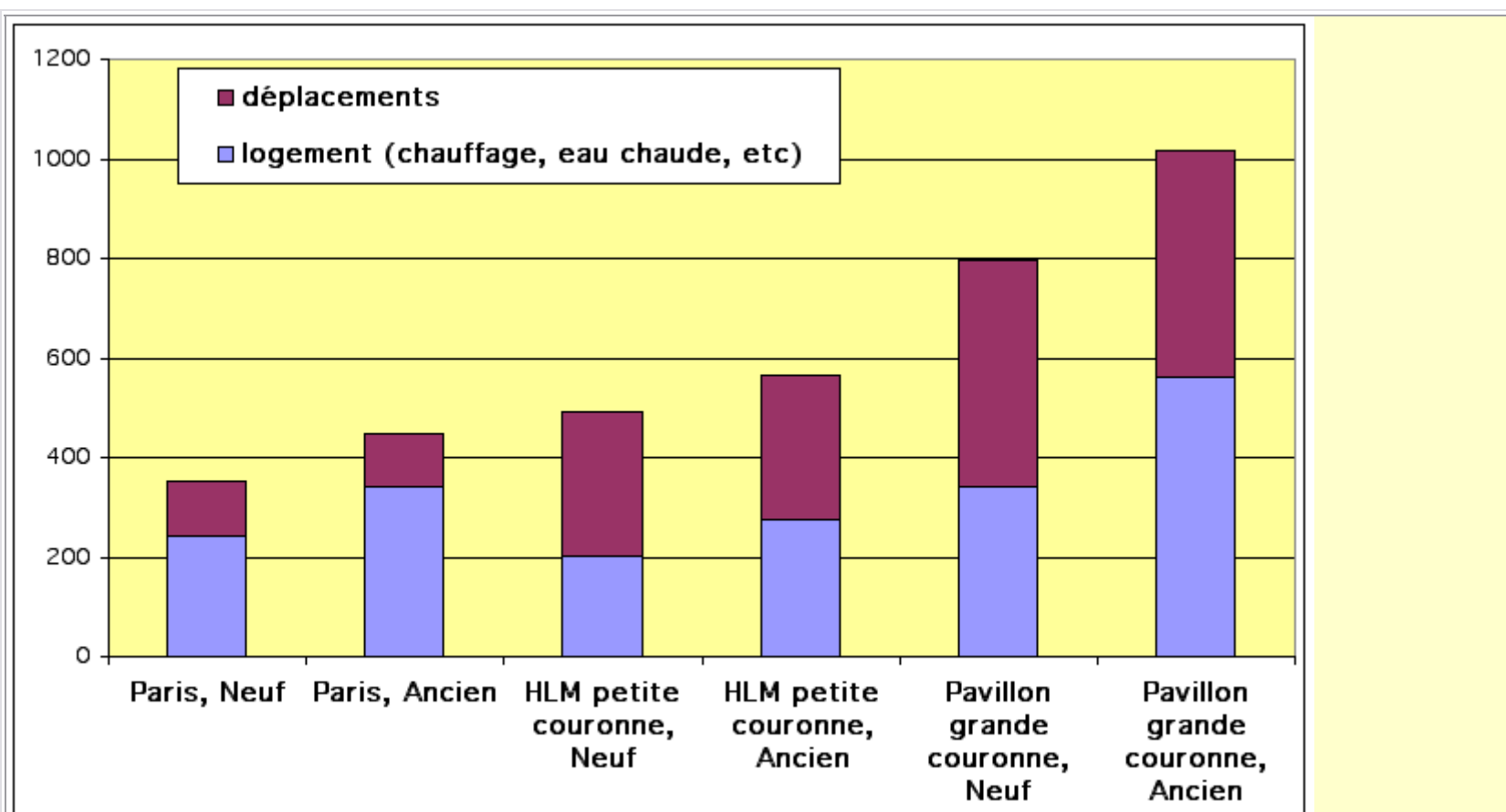
Référence : 6.000 km annuels en voiture en cycle urbain (ce qui correspond à une distance au travail de 15 km environ) engendrent environ 0,5 tonne équivalent carbone.

Si le parcours est fait en utilisant les transports en commun, le bénéfice question émissions sera de la quasi totalité si on passe de la voiture au vélo ou au train, et des 2/3 si on passe de la voiture au bus (ou au train dans les autres pays européens).

Si cela permet d'éviter la deuxième voiture pour le ménage il y aura des économies induites pour d'autres déplacements, sans parler des économies financières qui représenteront environ 2 à 3000 euros par an (le transport public coute en general la moitié du cout complet d'une voiture conduite par une personne seule).

➤Vivre en appartement et non en maison ++++ \$\$

Les appartements sont beaucoup moins consommateurs d'énergie pour se chauffer à superficie égale (jusqu'à deux fois moins), car la surface en contact avec l'extérieur est proportionnellement plus faible que pour une maison (le reste est en contact avec un autre appartement, généralement aussi chauffé). Il sont aussi, en général, situés en zones urbaines denses, donc proches des services (magasins, lieux de travail...) qui deviennent accessibles sans utiliser de voiture (à Paris, 1 personne sur 2 n'a pas de voiture).



Emissions annuelles de gaz à effet de serre (en kg équivalent carbone) par habitant, pour le total logement plus transport, pour 3 zones de résidence en Ile de France.

Source : Jancovici, sur données J.-P. Traisnel, les cahiers du CLIP, avril 2001

Il convient de noter que contrairement à une idée répandue, le fait d'habiter en banlieue, à superficie habitable par personne équivalente, ne permet pas d'économiser de l'argent sur le total "logement plus transports de base" : le foncier est certes moins cher, mais la différence est compensée par les coûts de transport (cf. ci-dessous).

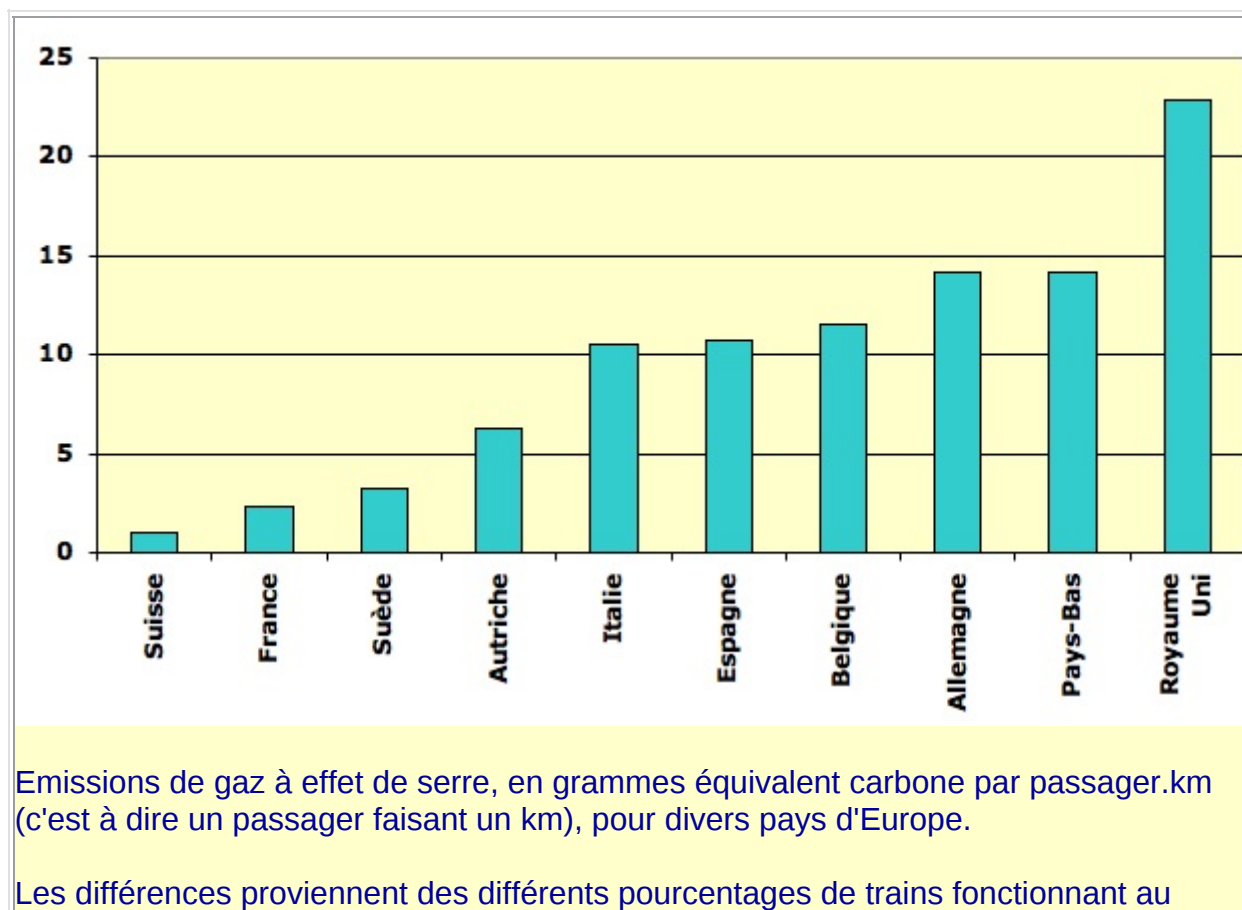
Zone	hyper-centre	centre	petite couronne	grande couronne
Revenu moyen du ménage (euros)	3.156	2.951	3.005	2.647
Locataires du privé : budget logement + transport du ménage	1.041	1.033	1.202	1.191
Accédants à la propriété : budget logement + transport du ménage	NS	1.092	1.382	1.403
Revenus et Budget Logement + Transports des ménages en fonction de la localisation du lieu de résidence. Source : INRETS , 1998				

➤ Laisser sa voiture au garage et prendre le train pour les déplacements de quelques centaines de km ++ \$

Référence : 1.000 kms en voiture en cycle interurbain engendrent au minimum 63 kg de carbone ; en train sur la même distance : environ 3 kg de carbone

La bilan de la substitution de la route par le rail est de 150 g de CO₂ par km. Sur un aller-retour interurbain de 500 km en tout (Paris-Lille par exemple) l'économie est de 20 kg de carbone. Si ce cas de figure se produit 10 à 20 fois par an (maison de campagne, famille, etc) le total en bout de course est de 0,25 à 0,5 tonne de carbone.

Passer de la voiture au train engendre toujours un bénéfice dans les autres pays, même si ce dernier est variable et généralement plus faible qu'en France.



diesel, de la manière de produire l'électricité pour les trains électriques, et enfin des taux de remplissage des trains.

Source : INFRAS, 1998

Par ailleurs, si l'on intègre l'amortissement de la voiture (ce qui est la manière normale de faire un calcul économique) dans le kilométrage parcouru (c'est un coût caché car on ne "voit" l'amortissement de la voiture que le jour où on l'achète !) le train coûte moins cher à 1 voire à 2 (dès que l'on est 2 on a une réduction) que la voiture, surtout s'il y a un péage d'autoroute en plus.

➤ Utiliser des modes non motorisés pour ses déplacements de proximité ++ \$

- ▶ utiliser les rollers ou le vélo si on n'a rien à transporter,
- ▶ acheter une [remorque à vélo](#) si on a des choses à transporter (jeunes enfants, marché, supermarché, etc)

➤ Remplacer sa chaudière au fuel par une chaudière à gaz ++ \$ (sur la durée)

Référence : Le gaz permet de diminuer ses émissions de 25% par rapport au fioul (à confort équivalent). Pour quelqu'un qui utilisait 2.000 l de fioul par hiver, cela représente 0,25 tonne équivalent carbone d'économie.

La moindre émission par unité d'énergie du gaz naturel est due au fait que les molécules de méthane (le principal composant du gaz) ont le ratio hydrogène/carbone le plus élevé de tous les hydrocarbures. Lors de la combustion, seul le carbone produit du CO₂, l'hydrogène ne produisant que de l'eau.

Notons toutefois que cette substitution n'est une bonne affaire que de manière transitoire : le gaz n'est pas plus éternel que le pétrole ! Cette substitution est donc uniquement une marge d'adaptation à court terme.

➤ Installer un chauffe-eau solaire +++ \$?

Référence : les émissions liées au chauffage et à l'eau chaude sanitaire d'un foyer "moyen" représentent près d'une demie-tonne équivalent carbone. Une installation solaire thermique permet de diviser ces émissions par 2 dans les bons cas.

Un [chauffage solaire](#) peut donc permettre de diviser par 2 sa facture de chauffage et d'électricité, même dans le Nord de la France. L'installation la plus facile à mettre en oeuvre concerne l'eau chaude sanitaire. Pour passer au chauffage central solaire, il faut par contre envisager de gros travaux de plomberie car il faut faire passer les tuyaux d'eau chaude dans le plancher.

Un [panneau photovoltaïque](#) permet quand à lui de diminuer la part de l'électricité achetée à l'extérieur mais coûte relativement cher. L'impact sur l'effet de serre est limité par le fait que la production d'électricité est en France à 90% nucléaire et hydraulique (en outre la fabrication du panneau engendre des émissions non nulles). Un tel panneau sera surtout utile dans l'avenir, par exemple pour recharger une voiturette électrique, ou pour stocker localement de l'hydrogène. Pour le moment, le photovoltaïque est beaucoup moins intéressant que le thermique pour limiter les émissions.

➤ Acheter le moins possible de produits avec beaucoup d'emballages +

Référence : faire un kg d'acier ou un kg de verre engendre 500 g à 1 kg d'équivalent carbone, faire un kg d'alu engendre 3 kg à 5 kg d'équivalent carbone.

Produire du plastique, du verre, du carton, de l'acier ou de l'aluminium (pour les canettes) etc consomme beaucoup d'énergie : en France, 4,/5 de l'énergie consommée par l'industrie le sont dans la production de matériaux de base (métaux, plastique, etc).

Tout ce qui permet de ne pas consommer d'emballage (éviter les produits frais emballés en barquettes plastique, les canettes jetables, etc) induit de facto une [économie d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre](#).

On remarquera que le fait de ne pas se fournir en hypermarché (voir plus haut) mais chez les commerçants locaux permet d'obtenir ce résultat (moins d'emballages) comme produit dérivé (il est rare qu'un marchand de fruits emballe ses pommes dans un film plastique, ou un vendeur de fromages dans une boîte en plastique elle-même dans un emballage carton !

➤ Acheter le moins possible de produits manufacturés +++++ \$\$\$

Référence : un kilo de produits manufacturés "contient" de quelques centaines à quelques kg d'équivalent carbone (voir plus pour les produits très chers). Par exemple, une voiture pesant une tonne "contient" 1,5 à 2 tonnes d'équivalent

carbone (c'est à dire que l'on a rejeté dans l'atmosphère 2 tonnes équivalent carbone pour la fabriquer, même si on ne l'utilise plus ensuite), un ordinateur "contient" quelques dizaines de kg équivalent carbone, etc...

Dès que l'on n'achète pas un produit manufacturé, on économise l'énergie nécessaire pour fabriquer le produit en question.

On peut commencer par ne pas acheter de choses dont on se servira une fois par an ou dont on n'a pas vraiment besoin, mais pour "aller plus loin" l'idéal est aussi de réduire sa consommation d'objets manufacturés : voitures, ordinateurs, jouets, électronique, vêtements, etc...

Cela signifie, hélas pour les industriels, que dans le contexte actuel moins on fait tourner l'économie manufacturière et plus on est vertueux sur le plan des émissions de gaz à effet de serre : [la croissance économique "fait de l'effet de serre"](#). Cela signifie aussi que, en tant que consommateurs, nous avons une responsabilité dont nous ne pouvons nous exonérer : **nous ne pouvons à la fois demander aux politiques la réduction collective des émissions et souhaiter pour nous-mêmes la croissance de nos consommations individuelles.**

Cela est aussi valable pour les services : sans parler des voyages en avion (voire ci-dessus), savez vous, par exemple, qu'une facture de téléphone de 150 euros "contient" au moins 4 kilos d'équivalent carbone ?

➤ Ne pas avoir de chien (spécialement en zone urbaine) + \$

Un chien signifie généralement :

► une consommation de produits carnés, or l'élevage (boeufs, moutons...) engendre de l'effet de serre et consomme de l'énergie,

- ▶ une voiture plus grande pour partir en vacances, donc une consommation au quotidien accrue,
- ▶ d'une manière générale un certain nombre d'aménagements dont la réalisation ou l'entretien consomme de l'énergie.

Très difficile

➤ Déménager pour moins se déplacer +++ \$\$\$

➤ Devenir travailleur à domicile +++++

Dans certaines conditions (travailler chez soi à temps plein, sans disposer d'un bureau ailleurs, et sans se déplacer plus pour d'autres motifs on peut économiser [près de 50% de l'émission annuelle moyenne d'un Français](#).

➤ Ne plus avoir de voiture du tout quand on en avait une +++ \$\$\$

A kilométrage égal, la voiture est 30 fois plus émettrice de gaz à effet de serre que le train ou le RER. Il faut 40 fois plus d'énergie pour faire un km en voiture qu'en vélo.

Et l'État ?

On trouvera [ici quelques réflexions](#) sur la manière dont l'État peut aussi concourir à diminuer les émissions de gaz à effet de serre (mais c'est très très loin d'être de sa seule responsabilité).

Je suis chef d'entreprise, directeur d'une unité opérationnelle d'un grand groupe, ou d'une administration : puis-je "faire quelque chose" pour le climat ?

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Que ce soit le reflet d'un optimisme qui ne serait pas de mise, ou celui d'un réel frémissement, je suis convaincu que certains "décideurs économiques" sont prêts à faire quelque chose pour faire baisser les émissions de gaz à effet de serre de l'entité qu'ils ont sous leur contrôle, même si cela leur demande un peu d'argent, de sueur ou de temps (et souvent les trois en même temps !).

Après tout, ils sont aussi, parfois (!), parents, ou grand-parents sincèrement préoccupés par les conséquences de nos actes actuels, ou conscients que leur propre bien-être pourrait être quelque peu malmené dans un [environnement gravement déstabilisé](#), ou encore parfaitement conscients de ce qu'une entreprise qui est largement dépendante des combustibles fossiles [est vulnérable sur le long terme](#), ou simplement désireux d'avoir un comportement "citoyen" ; bref il existe très certainement une fraction non négligeable - et sans aucun doute croissante - de ces "décideurs" qui, pour des raisons diverses, "veulent faire quelque chose".

Mais cette volonté, pour pouvoir être mise en oeuvre, doit s'appuyer sur la mesure (il n'y a pas de progrès possible sans mesure). Il faut donc estimer les émissions de l'entité qu'ils dirigent avec suffisamment de détails pour qu'ils puissent réfléchir à la meilleure manière d'agir à leur niveau pour faire baisser les émissions dont ils sont à l'origine.

C'est dans cet esprit que des méthodes et prestataires commencent à voir le jour, permettant de mesurer les émissions, préalable indispensable à toute action de réduction quelle qu'elle soit, et dont la simple réalisation fournira souvent - du moins c'est mon

expérience - des suggestions de réduction auxquelles on n'aurait jamais pensé sans cela, et surtout permet de savoir "ce que l'on gagne" et à quelles conditions.

En France, la démarche la plus aboutie s'appelle le Bilan Carbone, une méthode réalisée par votre serviteur pour l'[ADEME](#), et qui est [décrite ici dans son principe](#). Je suis bien entendu toujours [ravi d'en discuter avec toute personne intéressée](#)...

Vous "voulez faire quelque chose" ? La mesure des émissions dont vous êtes directement ou indirectement à l'origine est un bon premier pas, et d'expérience, vous serez surpris par les perspectives offertes par les résultats !

La "neutralité" CO₂ : vraie bonne idée, ou mise du doigt dans l'oeil jusqu'au coude ?

dernière version : janvier 2008

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

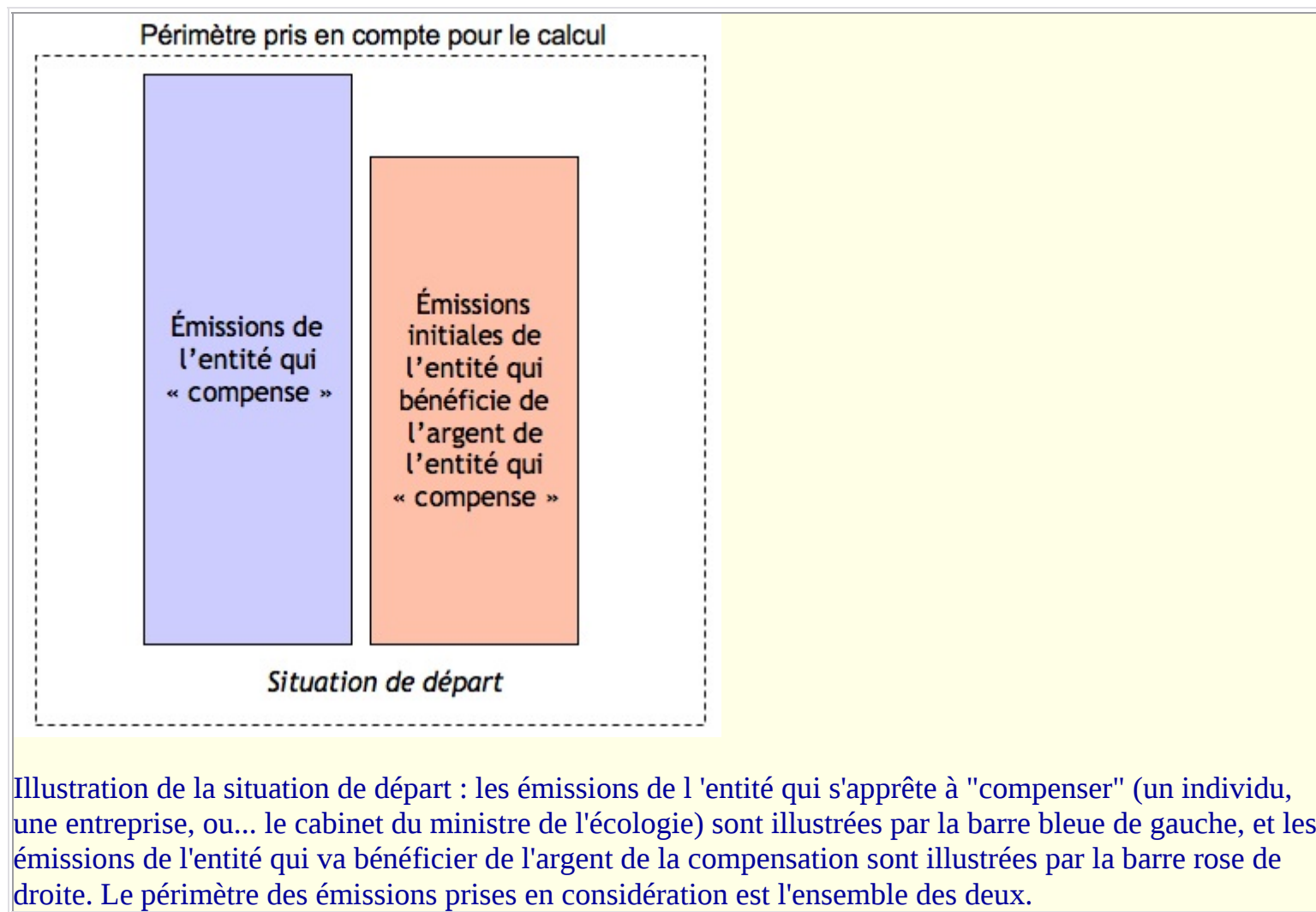
De tous temps, le péché a donné un poil mauvaise conscience à la grande majorité des bipèdes à cervelle que nous sommes, même quand nous nous y vautrons avec délices. Pour la grande masse des individus en porte à faux avec la morale du moment, il y a toujours la petite voix de la conscience qui rappelle que "c'est pas bien ce que vous faites", et qu'il va falloir voir à se racheter à une prochaine occasion.

A moins d'être sourd et aveugle, tout un chacun comprend que la morale du 21^è siècle encensera de moins en moins le fait de consommer de l'énergie à tour de bras en se souciant comme d'une guigne des conséquences possibles. Comme [nous ne sommes pas à une contradiction près](#), ce souci croissant de nos rejets ne nous empêche pas de continuer à considérer, dans le même temps, comme socialement désirable et économiquement souhaitable de consommer de plus en plus, et que même notre président a dit que c'était un objectif dans ses vœux aux Français. Avec ou sans président, du reste, le statut se mesure toujours à la taille du logement, à celle du moyen de transport, voire à la distance parcourue entre le domicile et le lieu de vacances : aller loin (aux Tropiques, en Patagonie, etc) c'est quand même plus chic pour épater les cop(a)in(e)s de bureau que d'aller dans le Morvan !

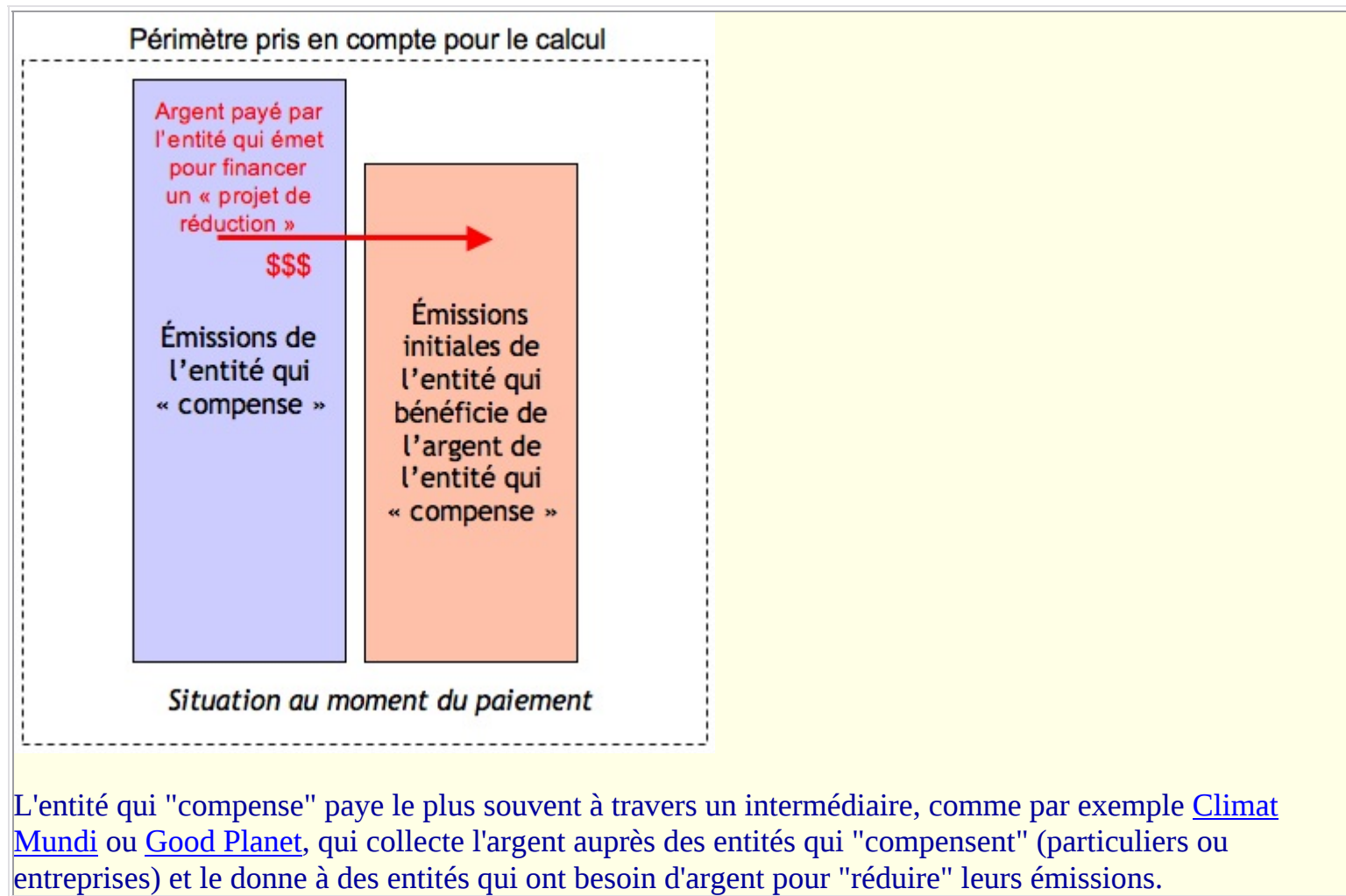
Mais si la morale - se comporter en écolo - et le statut - qui suppose d'avoir toujours plus - deviennent antagonistes, comment gérer cela ? Très simple : on ne change rien chez soi, et on demande aux autres d'être écolo à sa place en leur donnant un petit quelque chose. C'est bête comme chou, il suffisait d'y penser, non ? Cette trouvaille géniale s'appelle.... la "compensation" : à chaque fois que j'émetts directement ou indirectement des gaz à effet de serre, par exemple en allumant une chaudière, montant dans une voiture ou un avion, ou même en achetant un téléphone portable (car on émet aussi - indirectement - en achetant un téléphone ou en allant au restaurant !), je paye quelqu'un pour "désémettre" à ma place. Quand la "compensation" porte sur l'ensemble des émissions rattachées à un individu, une entreprise, un produit, etc, on utilise alors le terme de "neutralité" : sur le papier, la totalité des émissions prises en compte sont "annulées" par une réduction effectuée ailleurs. Je consomme, et tu dépollues à ma place sans avoir consommé, telle est la logique de ce miracle.

J'exagère ? Un peu, allez, parce que ce raisonnement suit une logique de type "vases communicants" qui est aussi employé dans le cadre du [protocole de Kyoto](#), pour les "mécanismes de développement propre", et qui n'est pas si stupide que cela vu d'en haut. Le raisonnement proposé est le suivant :

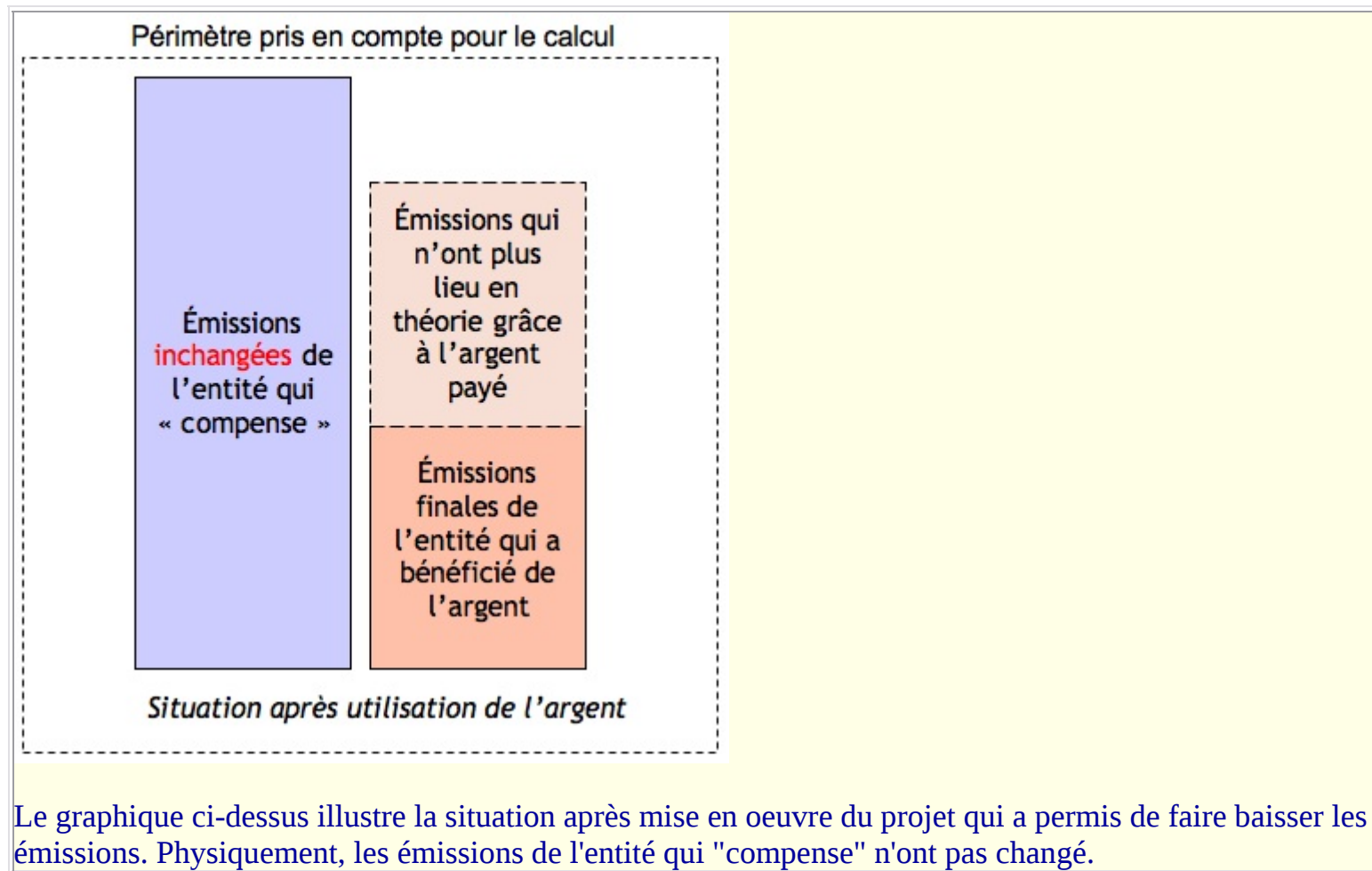
➤ on prend en considération la somme des émissions de l'entité qui "compense" et d'une autre entité, "ailleurs", que l'on va aider à réduire ses émissions (sur le papier, en fait on va voir plus bas que cette vision est souvent discutable).



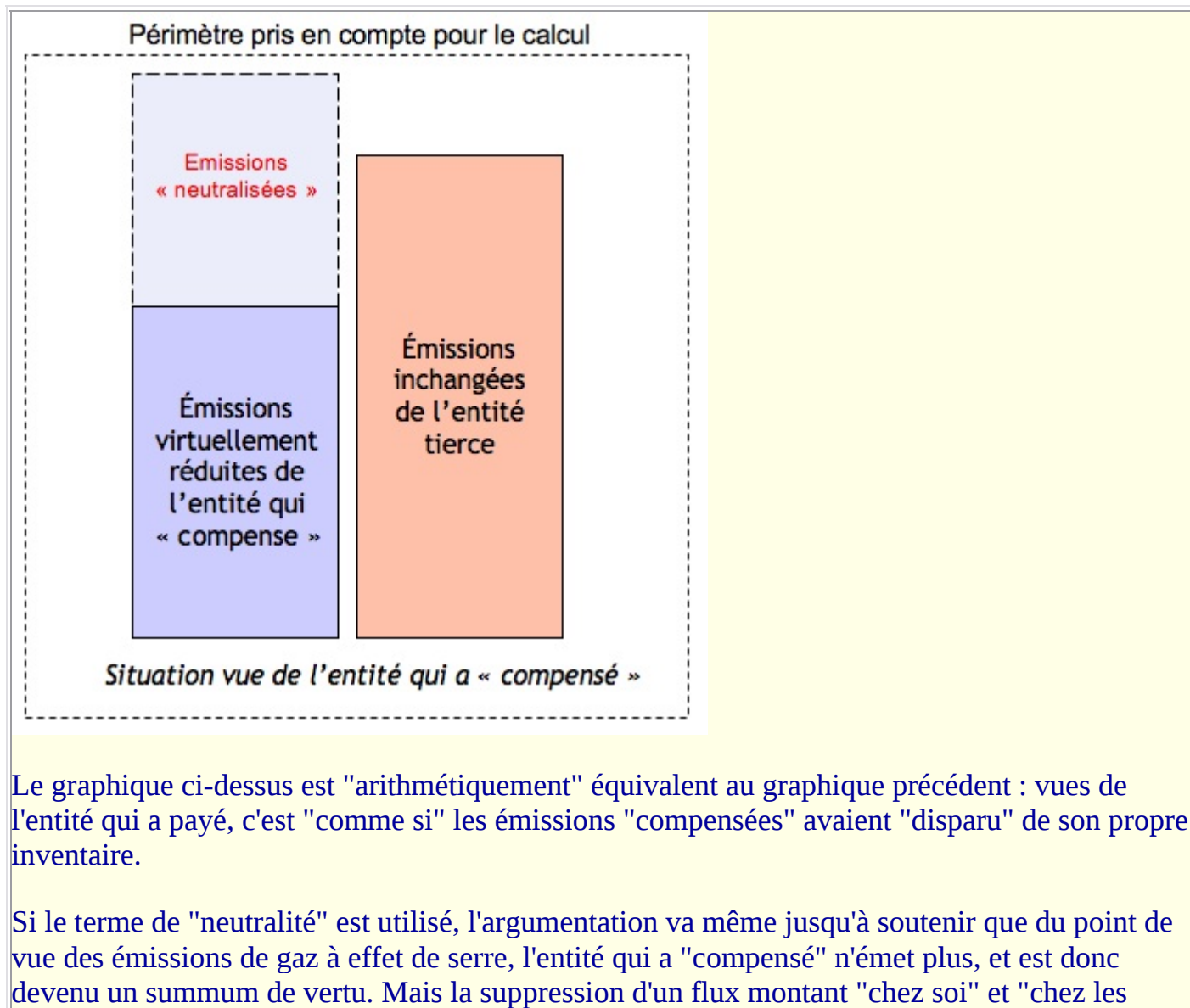
➤ L'entité qui "compense" valorise alors, sur la base d'un coût à la tonne de CO₂-équivalent, tout ou partie de ses émissions, et donne le montant ainsi calculé à l'autre entité "ailleurs".



- L'entité qui reçoit l'argent utilise ce dernier et fait baisser ses émissions propres... ou moins augmenter ses émissions futures (c'est une des faiblesses du système, voir plus loin).



➤Et le miracle arrive : arithmétiquement, la situation illustrée par le graphique ci-dessus est équivalente à la situation illustrée par le graphique ci-dessous.



autres" sont-elles en tous points équivalentes, notamment au regard de l'inéluctable diminution "un jour" de l'approvisionnement en hydrocarbure ?

C'est quoi le problème, alors ?

Cette "compensation" (ou "neutralité" quand elle concerne la totalité des émissions de l'entité qui paye), telle qu'elle est exposée ci-dessus, semble le bon sens même : si réduire ailleurs s'avère plus facile à faire que réduire chez soi, pour un prix inférieur et pas de changement des habitudes, on aurait bien tort de s'en priver. En effet, en matière de gaz à effet de serre, toute réduction ici est équivalente à une réduction ailleurs, à cause de la très longue durée de résidence dans l'atmosphère de ces gaz. Et de fait, si le bon fonctionnement de ce mécanisme de "compensation" était garanti dans tous les cas de figure, sans limite sur le volume d'émissions concernées, sans effet de report non pris en compte, et sans simple différé dans le temps des émissions concernées, cela serait parfait. Sauf que... quand on passe de la théorie à la pratique, il apparaît qu'il est tout sauf simple de garantir la réponse aux quelques petites questions suivantes :

- Où est la garantie qu'il n'y a pas d'effet de report, qui viendrait annuler le résultat ? Un effet de report survient quand ce qui n'est plus émis ici va être émis "ailleurs", mais n'est pas pris en compte dans le calcul parce que le périmètre est trop étroit.
- Les émissions évitées le sont-elles en même temps que les émissions de l'entité qui compense ? En d'autres termes, l'entité qui paye pour "compenser" achète une réduction qui survient au moment où elle paye, ou qui surviendra "plus tard" ? Si elle survient plus tard, comment être sûr qu'elle arrivera bien ?
- Dans tous les cas de figure, qui vérifie la réalité des émissions évitées, et comment garantir que cette vérification a de la valeur ?
- Comment vérifier que la "compensation" a bien un effet d'entraînement, en préparant l'entité qui paye à réduire ses émissions propres, et non un effet anesthésiant, en lui donnant l'illusion que le problème est sous contrôle et qu'il ne sera pas nécessaire de faire le moindre investissement lourd, alors qu'en fait ces derniers sont indispensables ?

➤ Cette "compensation" est-elle ouverte à tous, ou les premiers à s'en servir "piquent la place" et il n'y a pas de démultiplication possible ?

➤ La "compensation" est-elle aussi une bonne réponse à [l'inéluctable diminution de l'approvisionnement en pétrole, gaz et charbon](#) qui se produira au cours du 21^e siècle ?

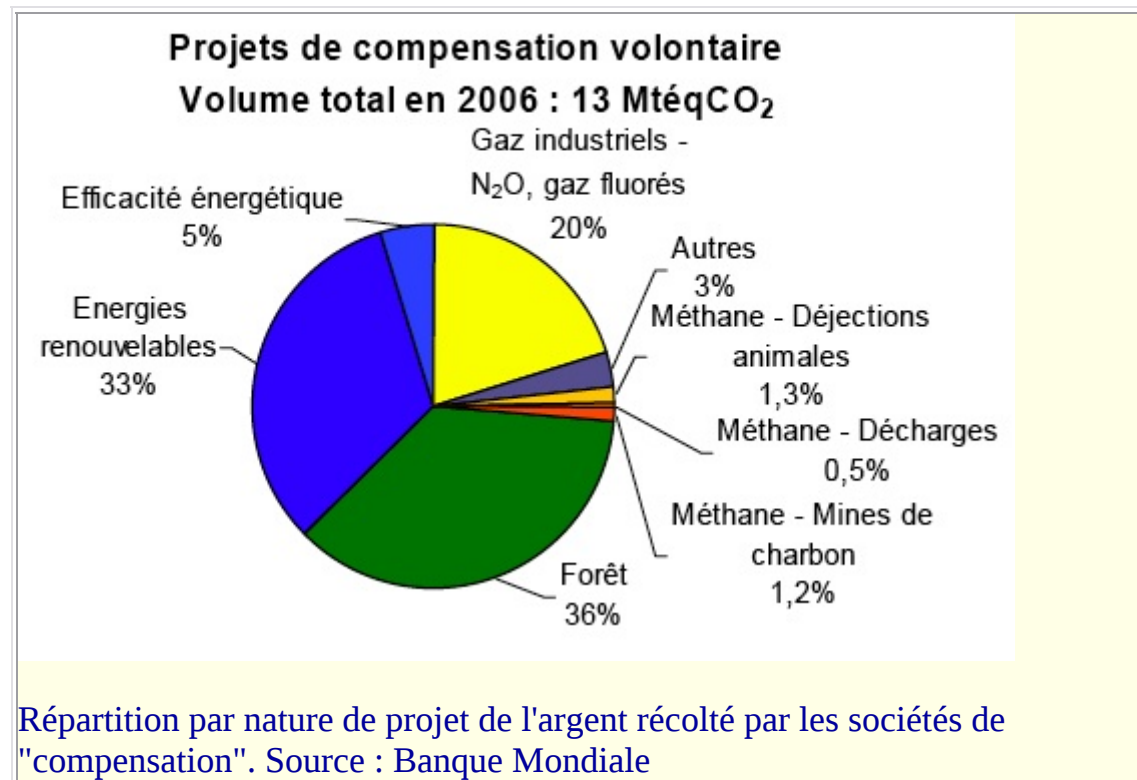
Emissions évitées ou émissions transférées ?

La première faiblesse possible du mécanisme va venir du choix du périmètre de calcul, qui peut fortement conditionner le résultat. En effet, dans la vraie vie, ce qui se passe ici est rarement complètement indépendant de ce qui se passe là, de telle sorte que le seul périmètre de calcul qui garantisse que l'on ne va pas passer à côté d'un phénomène de report (ce qui n'est plus consommé ici va être consommé là) est... la planète entière. Dit autrement, pour être rigoureux, il faudrait comparer les émissions de la planète entière si l'argent de la "compensation" existe, avec les émissions si cet argent n'existe pas. C'est bien évidemment impossible de procéder de la sorte pour au moins deux raisons :

➤ l'histoire ne s'écrit qu'une fois : "ce qui se serait passé si" ne peut être observé, mais simplement proposé,

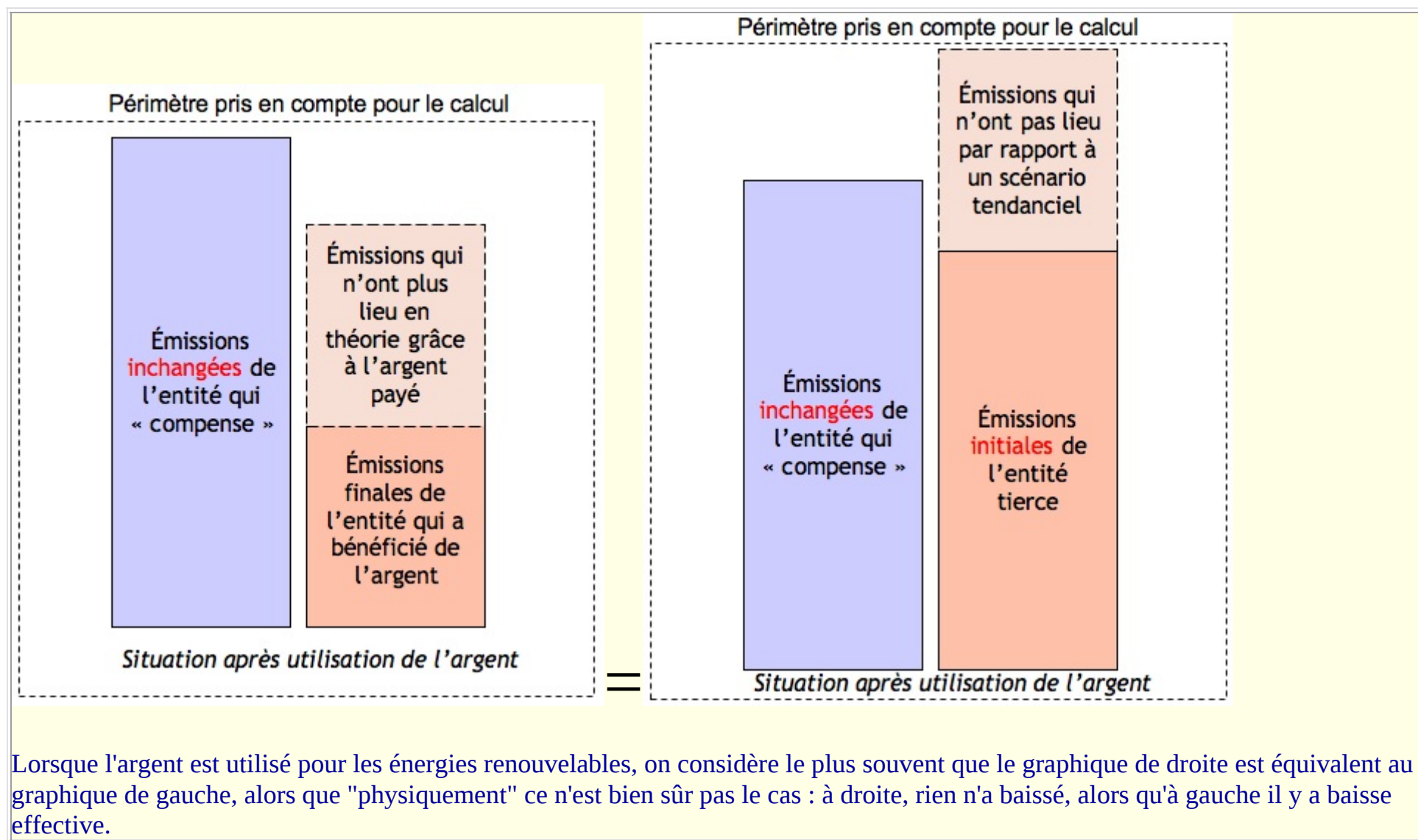
➤ le système est bien trop complexe pour avoir une visibilité directe sur l'ensemble des flux, et la limitation à un sous-ensemble de la planète est indispensable.

Avec certains projets, en particulier ceux qui portent sur des gaz hors CO₂, cette réduction est assez largement argumentable : si l'argent de la "compensation" sert à financer le captage de méthane d'une décharge, par exemple, et si cet argent était réellement introuvable dans le pays concerné, on peut accepter l'idée que ce qui a été payé a un effet réel sur la baisse des émissions : les émissions qui n'ont plus lieu dans la décharge vont rarement réapparaître ailleurs. Mais... ce genre de projet (les décharges) est une infime partie de ce qui est financé avec l'argent de la "compensation" (voir ci-dessous) et pour la déforestation évitée ou les énergies renouvelables le raisonnement est beaucoup plus discutable.



En effet, pour la forêt ou les renouvelables, le calcul de ce qui est "économisé" est en effet aussi fiable que la justification de ce qui s'appelle le scénario de référence, qui est "ce qui se serait passé si je n'avais pas payé".

Pour les renouvelables, le raisonnement le plus courant part du principe que sans l'argent permettant de faire des renouvelables on aurait fait du fossile "à la place". Ainsi faute d'éoliennes ou de photovoltaïque on aurait des centrales à charbon (pour une production équivalente), ou tout autre raisonnement équivalent. Mais en pareil cas, il n'est plus question de faire baisser les émissions de l'entité qui a reçu l'argent, mais... de moins les augmenter. Ce la revient à considérer comme comptablement équivalentes les deux situations illustrés par les deux graphiques ci-dessous, alors que physiquement cela n'est pas du tout le cas.



Cette utilisation d'un scénario de référence revient en pratique à "compenser" des émissions **actuelles** avec un gain **futur**, et donc à mettre sur un pied d'égalité des émissions passées, parfaitement réelles, avec des "gains" qui ont éventuellement lieu demain, et qui sont par nature spéculatifs. La "compensation" devient ici une "promesse d'évitement plus tard par rapport à un scénario tendanciel de croissance". En pareil cas on n'a rien fait baisser du tout !

Pour la forêt, nous allons le plus souvent avoir le même genre de faiblesse : pour un certain nombre de projets, le gain est associé à des arbres plantés aujourd'hui et qui absorberont "demain" du CO₂ en provenance de l'atmosphère. Ce genre de raisonnement mélange aussi présent et futur, et même à supposer que cela ne soit pas gênant de mélanger présent et futur, il y a d'autres hypothèses implicites qui sont faites en pareil cas :

➤ Cela suppose que le changement climatique en cours n'handicapera pas la croissance de ce qui est planté, alors que cela se discute [à l'échéance de quelques décennies](#),

➤ Cela suppose que la surface recouverte par les arbres plantés ne sera plus jamais défrichée, ce qui est là aussi discutable.

En clair, pour 2/3 au moins de l'argent actuellement payé dans des projets actuels de "compensation" (cf. répartition plus haut), il est difficile de justifier de manière irréfutable de ce qui est réellement économisé. Il est certes possible de corriger partiellement cette faiblesse avec une approche statistique, mais par contre cela ne répond pas aux "objections" qui seront formulées plus bas.

Gains vérifiés, ou simplement déclarés ?

Fort bien se dira le lecteur (ou la lectrice, bien sûr) : il n'y a qu'à vérifier, au cas par cas, que le raisonnement se tient ! En pratique, cependant, il n'y a quasiment jamais de vérification par un tiers que le raisonnement proposé se tient, sauf quand la "compensation" sert à acheter des crédits MDP (mécanismes de développement propre, voir [informations sur le protocole de Kyoto](#)). Tout repose donc sur l'affirmation de l'entité qui gère la "compensation".

Compenser, jusqu'où ?

Un autre point faible de ce mécanisme est qu'il est par construction limité à une fraction marginale des émissions mondiales (ça en limite l'intérêt !). En effet, la "compensation" concerne, le plus souvent, des projets qui ont lieu dans des pays dits "en voie de développement", lesquels représentent environ 40% des émissions mondiales. De ce fait le processus de la "compensation" correspond à un flux qui est à peu près le suivant : moi, habitant d'un pays "riche", je paye un habitant d'un pays "pauvre", qui déjà émet moins que moi, pour qu'il émette moins encore. On comprend bien que la portée de ce genre d'action est limitée... Et de fait, il va être difficile de se "débarrasser" de la [moitié des émissions mondiales](#) en faisant porter une fraction significative de l'effort à des pays qui émettent 40% de ces mêmes émissions !

Une autre manière de dire la même chose est de souligner que le prix très faible de la "compensation" actuellement (5 à 20 euros la tonne de CO₂-équivalent) ne peut s'appliquer qu'à de tous petits volumes. Pour le montrer, admettons que toute émission sur la planète soit "compensable" au prix de 10 euros la tonne de CO₂-équivalent, sans limite de volume sur les émissions. Cela signifie que la planète entière peut devenir "neutre en carbone", comme l'affirme implicitement sans rire le site de [Climat Mundi](#) (où le 28 décembre 2007 il est écrit que "potentiellement tout peut devenir neutre en carbone", donc pourquoi pas la totalité de la planète ?). Compenser la totalité des émissions mondiales serait alors possible pour 500 milliards d'euros, soit un peu plus de 1% du PIB mondial. Dit autrement, en travaillant 1% du temps (le PIB ne compte que le travail humain, à peu de choses près) on peut faire ce qu'il faut pour "effacer" les émissions qui sont proviennent des 99% de temps de travail restant. Sûr que si c'était possible, ça serait super !

Comme "compenser" à 10 euros la tonne équivalent CO₂ ne fonctionne que pour des petits volumes, cela signifie que la compensation à ce prix là ne fonctionne que tant qu'elle est invisible dans les émissions mondiales, ou encore que c'est une mesure du type "le premier qui pique la place empêche les autres d'y avoir accès". Or cette règle n'est pas vraie tout le temps en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et la plupart du temps c'est même l'inverse qui s'applique: l'essentiel des marges de manoeuvre reste accessible à tout le monde même quand certains en ont déjà profité. Il en va ainsi de [l'isolation des logements](#), du remplacement d'une voiture [par un vélo](#) ; si un individu A isole son logement ou se met au vélo, cela n'interdit en rien à un individu B de faire de même. Par contre, le simple fait que certains "compensent" supprime la marge de manoeuvre pour d'autres (c'est aussi vrai pour l'électricité "verte" : comme notre pays ne peut en faire que 15% - [l'éolien est négligeable](#)

[devant l'hydroélectricité](#) et ca le restera, ceux qui l'achètent empêchent par là même "les autres" d'en consommer ; la "vraie" mesure reproductible est bien de faire baisser la consommation).

Regardons les chiffres, pour finir : en 2006, la "compensation" a porté sur 13 millions de tonnes équivalent CO₂, alors que les émissions mondiales ont été de 50 milliards de tonnes équivalent CO₂ la même année (et étaient de 40 milliards de tonnes équivalent CO₂ en 1990). La "compensation" porte donc sur 0,03% des émissions mondiales ou encore 2% de l'augmentation annuelle moyenne depuis 1990. Ce n'est pas avec cela que nous allons diviser les émissions par deux d'ici 2050, [ce qui est indispensable pour ne pas payer une addition climatique trop salée](#) !

Compenser, quel effet d'entraînement ?

Dès lors que "compenser" est par construction même un "petit geste", cela n'évacue pas pour autant l'intérêt d'y recourir si nous pouvons être sûrs que cela prépare les esprits à effectuer des efforts plus importants ensuite. Mieux, si nous pouvions démontrer que cela constitue le moyen le plus efficace d'avoir rapidement des "gros gestes" derrière, alors la compensation doit devenir obligatoire !

C'est la théorie du "pied dans la porte", qui est à la base de nombre de méthodes d'éducation, de vente, voire d'endoctrinement : visez gros, mais commencez petit. Si cet argument est valable ici, et que "compenser" est un bon moyen d'augmenter l'acceptabilité d'une action plus contraignante "plus tard", et est réellement pris comme la première marche d'un escalier qui en comporte beaucoup plus, alors c'est bien évidemment une bonne idée.

Mais... l'effet inverse existe aussi, quand le petit geste est compris comme le "gros geste" qu'il n'est pas, et du coup inhibe le gros geste au lieu de le provoquer. A ce moment là, au lieu d'avoir l'effet d'entraînement désiré, le "petit geste qui se prenait pour un gros geste" a un effet anesthésiant, en apaisant le sentiment d'urgence alors que rien n'est réglé. Dans le cas qui nous concerne, l'utilisation même des termes "compensation" ou "neutralité" accrédite l'idée que la nuisance n'existe plus. En comptabilité (et même en Français), "compenser" c'est bien annuler l'effet d'un flux par un flux inverse de même ampleur, et "neutralité" est plus

explicite encore : si je deviens "neutre en carbone", c'est bien que je cesse d'avoir un effet sur l'environnement, non ? Difficile avec le terme même de "neutralité" d'avoir immédiatement à l'esprit que c'est globalement un geste très insuffisant !

Pour aller plus loin dans ce débat, il serait utile d'avoir la réponse à la question suivante : en matière d'environnement, le "petit geste" est-il un précurseur du "grand geste", ou au contraire son substitut ? Pour le savoir, le mieux serait évidemment de poser la question à tout le monde ! L'[Institut Français de l'Environnement](#) ne l'a pas fait, mais a néanmoins récemment effectué une enquête qui va nous servir pour notre débat ("Les pratiques environnementales des Français en 2005").

Dans le cadre de cette étude, l'IFEN a réalisé une espèce de nomenclature des Français en fonction de leurs réponses à des questions sur l'état de l'environnement et de l'appréciation qu'ils portent sur leur propre sensibilité environnementale. Cela permet de classer la population en 6 catégories :

- Les « Plutôt impliqués, pessimistes » estiment que l'état de l'environnement dans le monde est mauvais (56%) et déclarent majoritairement agir pour l'environnement (71% à 76% des individus de la classe). Ils pensent plutôt que la vie moderne nuit à l'environnement et que les menaces qui pèsent sur l'environnement ne sont pas exagérées.
- Les « Plutôt impliqués, optimistes » pensent plutôt que l'état de l'environnement est bon en France ainsi que dans leur commune (88%) et moyen dans le monde. Ils estiment que la vie moderne ne nuit pas à l'environnement. Ils affirment plutôt agir en faveur de l'environnement même si cela leur prend du temps (à 92 %).
- Les « Pas concernés » sont des individus qui ne se sentent pas réellement concernés par les problèmes d'environnement et déclarent ne pas agir en faveur de l'environnement.
- Les « Intéressés, non impliqués, pessimistes » sont des individus qui ont une vision négative de l'état de l'environnement (pour 91% d'entre eux l'état de l'environnement dans le monde est mauvais) mais déclarent ne rien faire en faveur de l'environnement. Ils estiment que la vie moderne nuit à l'environnement et que les pouvoirs publics devraient plus écouter les associations.
- Les « Très engagés, pessimistes » affirment agir pour l'environnement (90% d'entre eux font ce qui est bon pour l'environnement même si cela leur prend du temps. 74 % d'entre eux pensent que l'état de l'environnement dans le monde est

mauvais et trois quarts d'entre eux estiment que les pouvoirs publics devraient davantage écouter les associations pour résoudre les problèmes liés à l'environnement.

➤ Les « Très engagés, sans opinion, optimistes » sont surtout des individus qui affirment agir pour l'environnement tout en n'ayant pas d'avis sur un certain nombre de questions (par exemple : 30% n'ont pas d'avis sur l'état de l'environnement dans le monde). Ils ont une vision positive quant à l'état de l'environnement : 82% d'entre eux estiment que l'état environnemental de leur commune est bon, la moitié d'entre eux estime que l'état environnemental de la France est bon. La moitié d'entre eux pense que les menaces pesant sur l'environnement sont exagérées.

L'IFEN a ensuite regardé comment, en fonction de leur appartenance à l'une de ces catégories, nos concitoyens se comportaient pour 8 "petits gestes", ou se jugeaient pour 6 façons de porter de l'attention à une partie de leur consommation.

Les 8 "petits gestes" en question sont les suivants (entre parenthèses la fraction de la population qui répond par l'affirmative) :

- Tri régulier du verre usagé pour le recyclage (pratiqué par 77% des Français)
- Tri des piles usagées pour le recyclage (pratiqué par 73% des Français)
- Tri régulier des vieux papiers, journaux et magazines pour le recyclage (pratiqué par 71% des Français)
- Tri régulier des emballages et des plastiques pour le recyclage (pratiqué par 71% des Français)
- Arrêt systématique de la veille de la télévision (pratiqué par 69% des Français)
- Apport d'un cabas à roulettes, d'un panier ou de sacs pour faire les courses (pratiqué par 63% des Français)
- Achat au cours du dernier mois dans un magasin Bio ou dans le rayon Bio d'un supermarché (pratiqué par 21% des Français)
- Équipement d'une part importante des luminaires par des ampoules basse consommation (pratiqué par 15% des Français)

Les 6 manières de porter de l'attention à une partie de sa consommation sont les suivantes (entre parenthèses le pourcentage de la population qui déclare faire attention ou connaître son impact) :

- Attention à la consommation d'électricité (déclaré par 84% des Français)
- Attention à la consommation d'eau (déclaré par 77% des Français)
- Connaissance du montant de la facture d'électricité (déclaré par 70% des Français)
- Attention à la consommation d'énergie lors de l'achat d'un électroménager (déclaré par 59% des Français)
- Connaissance du montant de la dépense annuelle en eau (déclaré par 56% des Français)
- Attention à la quantité de déchets qu'implique l'achat de certains produits (déclaré par 17% des Français)

Tout ça pour quoi ? Tout ça pour un premier résultat : tant que nous sommes dans les petits gestes, tout le monde est vertueux ou presque. Un premier tableau ci-dessous donne le nombre de "petits gestes" (le maximum possible est de 8, cf. liste un peu plus haut) effectués en fonction de la catégorie (plutôt impliqués pessimistes, pas concernés, etc) :

Nombre de pratiques	Plutôt impliqués pessimistes	Plutôt impliqués optimistes	Pas concernés	Préoccupés non impliqués pessimistes	Très engagés pessimistes	Très engagés optimistes
0 à 3 pratiques	16,3%	15,6%	48,9%	32,2%	15,1%	14,7%
4 à 6 pratiques	70,3%	75,7%	47,9%	55,7%	64,8%	69,9%
7 à 8 pratiques	13,4%	8,8%	3,2%	12,1%	20,1%	15,4%
Total	100,0%	100,1%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Le second tableau concerne "l'attention portée à" (la facture d'eau, d'électricité, etc) en fonction de la catégorie :

Pourcentage du total	Plutôt impliqués pessimistes	Plutôt impliqués optimistes	Pas concernés	Préoccupés non impliqués pessimistes	Très engagés pessimistes	Très engagés optimistes
0 à 2 pratiques	12,5%	18,5%	26,9%	16,4%	10,9%	15,4%
3 à 4 pratiques	50,9%	51,8%	51,9%	49,9%	47,5%	47,3%
5 à 6 pratiques	36,6%	29,7%	21,2%	33,8%	41,6%	37,3%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,1%	100,0%	100,0%

Sans surprise, les plus mauvais élèves pour les petits gestes sont les "pas concernés". Sans grande surprise aussi, les "très engagés", qu'ils soient optimistes ou pessimistes, font partie des pratiquants les plus assidus de ce mêmes "petits gestes". A l'auto-appréciation sur "je fais attention à", ce sont les mêmes catégories qui se distinguent dans un sens ou dans l'autre.

De tout cela nous ne déduirions rien de particulier, mais il se trouve que l'IFEN a aussi eu l'idée géniale, dans cette même enquête, de regarder quelque chose qui compte beaucoup plus dans les émissions, à savoir l'emploi ou non de la voiture pour aller au travail, objet du tableau ci-dessous. Je laisse le lecteur bien regarder les chiffres, et rendez-vous sous le tableau !

Parmi les moyens de transport suivants, lequel utilisez-vous habituellement pour vous rendre sur votre lieu de travail ou d'études ?

En %	« Plutôt impliqués pessimistes »	« Plutôt impliqués optimistes »	« Pas concernés »	« Préoccupés non impliqués pessimistes »	« Très engagés pessimistes »	« Très engagés optimistes »	Total
Une voiture ou un véhicule utilitaire exclusivement	59,6	56,9	53,5	52,1	52,7	62,6	56,4*
Une moto, un scooter ou un autre deux-roues motorisé exclusivement	1,2	1,0	1,5	0,3	1,4	0,8	1,1
Total voiture et deux-roues motorisé	60,8	57,9	55,0	52,4	54,1	63,4	57,5
Un ou plusieurs transports en commun exclusivement	12,6	12,8	16,7	17,4	11,2	11,6	14,2
Un vélo exclusivement	1,2	3,0	2,0	2,6	2,8	0,6	1,9
La marche à pied	8,5	7,3	10,3	10,5	12,8	10,4	9,5
Total modes « doux » (transports en commun, vélo, marche)	22,3	23,1	29,0	30,6	26,8	22,6	25,6
Un véhicule personnel (voiture ou deux-roues) et un ou plusieurs transports en commun	16,0	18,2	14,8	16,3	16,2	13,1	15,9
C'est trop variable pour répondre	0,9	0,8	1,3	0,7	2,9	0,9	1,1
Total	29,2	16,4	25,2	14,6	5,7	8,9	100,0

Surprise ! Quand on passe des petits trucs qui ne coûtent rien à un poste qui est bien plus significatif, ce sont les "pas concernés" et "préoccupés non impliqués" qui sont les plus vertueux du lot, pendant que les "très engagés optimistes" sont les plus mauvais élèves, talonnés par les "plutôt impliqués". Seuls les "très engagés pessimistes" sont aussi vertueux que les j'm'en-foutistes !

Réciproquement, le taux d'utilisation des modes "doux" est maximal chez les "non impliqués", juste avant les "pas concernés". En clair le comportement effectif de nos braves sondés, sur la manière de se déplacer, action qui est nettement plus impactante pour l'environnement que [les ampoules basses consommation](#), est sans lien avec la note qu'ils s'attribuent sur leur sensibilité environnementale, voire franchement à l'opposé.

Au vu de ce résultat, certes partiel, reposons nous la question : le "petit geste", dans cette affaire, il prépare le "grand geste", ou au contraire il le remplace, et sert essentiellement à donner bonne conscience à celui ou celle qui n'a que modérément l'intention de faire plus d'efforts ? Si nous sommes dans le deuxième cas, comme [les efforts importants ne sont pas négociables](#), alors la "compensation" n'est pas utile, mais au contraire nuisible, puisqu'elle fait perdre du temps en donnant l'illusion que le problème est sous contrôle alors que ce n'est pas le cas.

Compenser, quel effet sur l'exemplarité ?

Si l'effet négatif ci-dessus est avéré, il justifie à lui tout seul de jeter cette manière d'agir aux oubliettes, et de se dépêcher de commencer à se préoccuper de réductions (qui ne seront jamais plus faciles chez les autres que chez soi-même, il ne faut pas croire que tout le monde sauf soi peut agir les doigts dans le nez...).

Mais il y a un autre effet négatif de la compensation, pour le coup certain, qui est que, "vu de l'extérieur", celui qui "compense" et celui qui ne compense pas se comportent de la même manière. La compensation n'a donc aucun effet d'entraînement sur les habitudes observées par les Chinois, les Brésiliens, ou même mon voisin de palier, qui voient le "compensateur" prendre l'avion après "compensation" même pareil que s'il n'avait rien payé. Quand on réduit, on agit de manière visible : on change la logistique, on change un bâtiment, on change un produit, on se déplace moins ou autrement, bref ça se voit, un peu ou beaucoup ; cela permet de créer - parfois au prix de gros efforts, c'est clair - des méthodes, des objets, des actions qui sont souvent reproductibles. Quand on "compense", rien ne change vu de l'extérieur, et on ne crée rien de reproductible, puisque c'est le premier qui occupe la place qui la prend, comme nous l'avons vu plus haut.

En poussant à la conservation des habitudes, la compensation contribue donc à différer la réalisation des investissements structurants qui sont pourtant indispensables pour faire baisser **volontairement** les émissions mondiales de manière très significative. Cet effet induit n'interdit peut-être pas de donner de l'argent à autrui pour l'aider à faire baisser ses émissions, mais cela devrait à coup sûr dissuader de sortir tambours et trompettes autour de ce genre de mesure en invoquant sa "neutralité" en carbone !

Compenser, une assurance tous risques pour les ressources aussi ?

Enfin un dernier inconvénient majeur de la compensation est que... elle ne crée pas de pétrole. "Compenser" avant de monter dans sa voiture ou d'allumer sa chaudière permet peut-être de se rassurer pour ce qui concerne son impact environnemental, mais ça ne crée pas une goutte de fioul domestique, d'essence ou de kérosène. Or nos sociétés et notre système socioéconomique vont devoir s'adapter à une énergie fossile en baisse, même si nous ne le voulons pas : où est la préparation à cette situation dans la "compensation" ? Il faut bien comprendre que "se préparer" signifie "investir", ce qui ne se fait généralement pas en une seconde quand les ennuis sont là, et cela peut aussi signifier "changer ses habitudes", qui ne seront jamais plus faciles à changer chez soi que chez les autres. Et si le "petit geste" diffère les investissements pour faire face à une évolution certaine pour l'avenir, alors il augmente - faiblement certes, mais il l'augmente - la probabilité d'ennuis futurs faute de s'être adaptés à temps à une situation radicalement nouvelle.

Ce propos va aussi permettre de rappeler qu'il n'existe pas d'émissions "irréductibles", terme évoqué parfois par les "compensateurs". Comme les mathématiques imposent que les émissions de CO₂ d'origine fossile tendront vers zéro avec le temps, aucune réduction n'est impossible : ce n'est qu'une question de temps, et la seule question est de savoir si nous gérerons ou nous subissons une tendance aussi certaine "un jour" que 2 et 2 font 4. En gros, une entité qui "compense" a fait le plus difficile : payer un petit quelque chose, et lui reste à faire le plus facile : fonctionner avec une consommation décroissante de combustibles fossiles. Heu, j'aurais interverti les adjectifs ?

Ne plus compenser, c'est cesser d'aider les autres ?

Evidemment, l'un des arguments massue de la compensation est que l'argent versé aide les autres à faire face à leurs propres émissions. Aider les autres est une excellente idée, et du reste la question des transferts de technologie va probablement devenir un enjeu important des [négociations internationales](#). L'idée plus discutable est d'avoir décidé de baser une telle aide, nécessaire, sur le montant de ses propres émissions, ouvrant ainsi la voie à une "compensation" qui par certains côtés est une vue de l'esprit. Décorrélér les deux est parfaitement possible : il "suffit" de dire que l'aide au "développement" se limitera désormais à des projets qui font baisser les émissions tout en améliorant l'ordinaire des destinataires (c'est techniquement possible), et de dire par ailleurs qu'une fraction un peu supérieure de nos impôts (assis sur nos revenus et non sur nos émissions) ira dans l'aide en question.

Conclusion ?

Le seul terme de "compensation" - ou pire encore de "neutralité" - est très souvent compris par les gens peu acculturés au problème (c'est à dire 99,9% des français) comme une vraie solution à un vrai problème. Mais un des vrais problèmes, dans cette affaire de changement climatique et de ressources fossiles, est surtout la résistance au changement, qui, [à en croire Jared Diamond](#), a emporté nombre de civilisations. Nous sommes [sous contrainte majeure de temps dans cette histoire](#), et le danger à éviter n'est pas que vos voisins vous regardent d'un sale oeil parce que vous êtes montés dans l'avion [sans payer l'indulgence](#), mais "simplement" [l'effondrement du système socioéconomique actuel](#) sous les coups de boutoir du manque de ressources et d'une perturbation environnementale croissante.

Dans ce contexte, il importe d'être bien sûr que la "compensation" fait gagner du temps pour éviter une ["fin de l'histoire" pas spécialement sympathique](#), et le moins que l'on puisse dire est que la réponse positive n'est pas évidente...

Manicore, source d'économies ou de pollution supplémentaire ?

dernière version : avril 2006

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Un correspondant facétieux (mais l'était-il vraiment ?) m'a un jour demandé si mon métier servait vraiment à quelque chose, et si la "pollution climatique" que j'engendrerais, directement ou indirectement, n'était pas supérieure à celle que je fais éventuellement économiser. Intéressante question, comme on va le voir, parce que d'y répondre est loin d'être trivial.

La "pollution climatique" que j'engendre directement, c'est-à-dire les émissions de gaz à effet de serre qui sont la conséquence immédiate de l'activité "professionnelle" de ma petite boutique, elle est facile à évaluer :

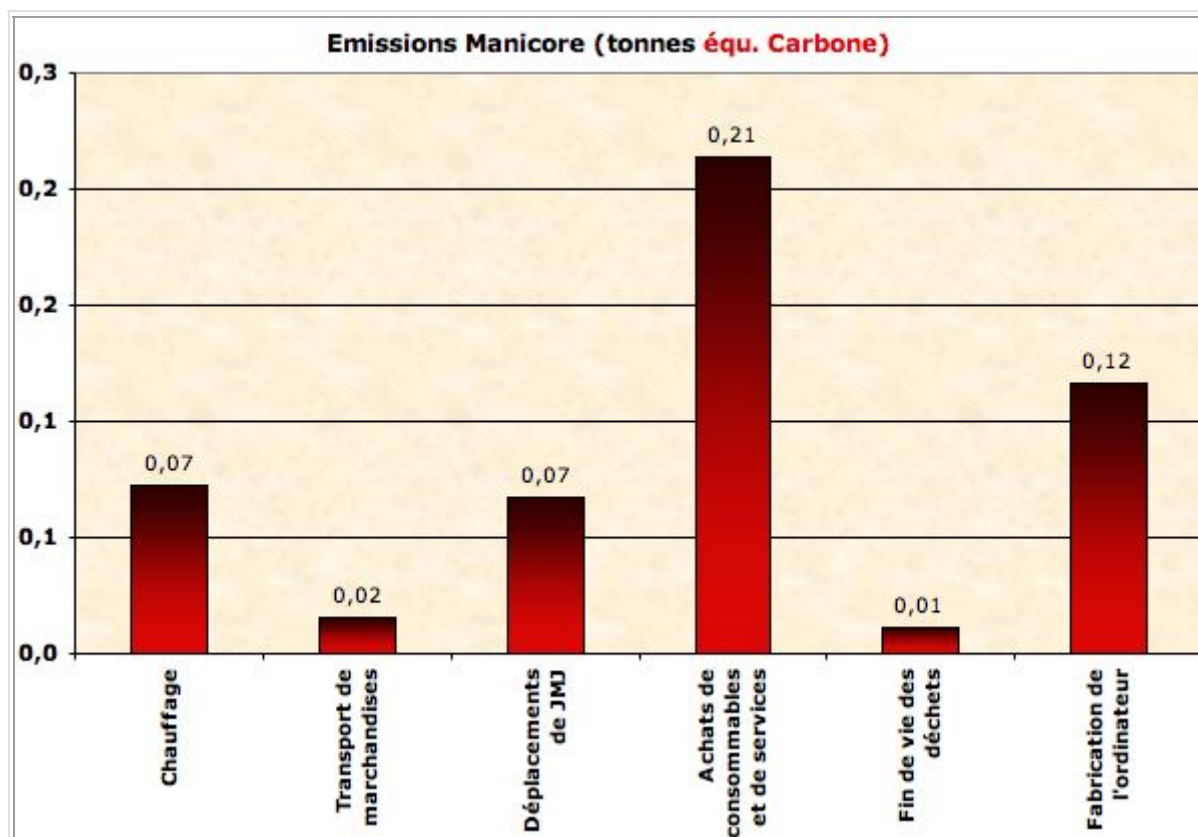
- j'ai un bout de bureau, avec un bout de radiateur, qui hérite donc des émissions d'un bout de chaudière au prorata de la surface du bureau,
- je consomme de l'électricité, même si c'est de la bonne électricité nucléohydraulique (ou hydrocléaire, au choix !), à pas grand'chose comme CO₂, pour l'essentiel,
- j'achète un ordinateur tous les 3 ou 4 ans, qu'il a bien fallu fabriquer, et cela a consommé plein d'électricité au charbon (les fabricants de semi-conducteurs sont situés pour une large part aux USA, au Japon, à Taïwan, en Chine, en Asie du Sud Est, et tous ces braves gens font une large part de leur électricité avec du charbon) ; cette fabrication a aussi nécessité la production de plein de produits chimiques intermédiaires qui ont eux-même nécessité plein de chaleur et d'électricité pour être produits, etc, (par contre je ne compte rien pour le fax, que j'ai acheté il y a 15 ans, ni pour mon imprimante, qui en a bien 10, ni pour mon téléphone, qui est à peu près aussi antique...),
- je me promène pour aller voir mes clients (en train certes, mais ça fait un petit quelque chose quand même), et j'ai même l'occasion de dormir à l'hôtel de temps en temps (où là aussi j'hérite des émissions de la chaudière de l'hôtel au prorata de la surface de la chambre et de la durée de séjour, et même des émissions de construction de l'hôtel au prorata de la durée de séjour !),

➤ j'achète quelques fournitures (un peu de papier, un agenda - je ne me suis pas encore mis au Palm, quelques cartouches d'impression, etc).

➤ j'invite mes clients dans de luxueux restaurants surchauffés et surclimatisés, avec des serveurs en livrée qu'il a fallu fabriquer (la livrée, pas le serveur), et servant des mets raffinés importés de l'autre côté de la planète par avion (bon là j'exagère un peu, mais il n'en reste pas moins que je confesse aller au restaurant de temps en temps, et il est indéniable qu'il y a des émissions de gaz à effet de serre "incluses" dans la nourriture qui m'est servie, auxquelles il faut rajouter les émissions liées au fonctionnement du restaurant, aux transports associés, à la fabrication des emballages dans lesquels le restaurant a reçu sa nourriture, etc),

➤ et j'en oublie sûrement.

Même sur cette partie là, je ne suis pas tant que cela une menace de deuxième plan : mon activité me conduit à mettre autant que le quota annuel autorisé dans le monde du "développement durable" (et je n'ai pas encore compté mes émissions personnelles !).



Emissions de Manicore en 2005 pour mon activité de conseil, en tonnes équivalent carbone (total = 0,5 tonnes équ. C, soit le quart des émissions moyennes d'un Français, mais [autant que le quota maximal admissible par an pour ne plus augmenter le CO2 dans l'air](#)). Même là je suis déjà au-dessus de ce qu'il "faut faire". Les achats de consommables et de services regroupent les cartouches d'encre, les repas au restaurant, les nuits d'hôtel, les factures de téléphone et autres services tertiaires, etc.
Calcul de l'auteur

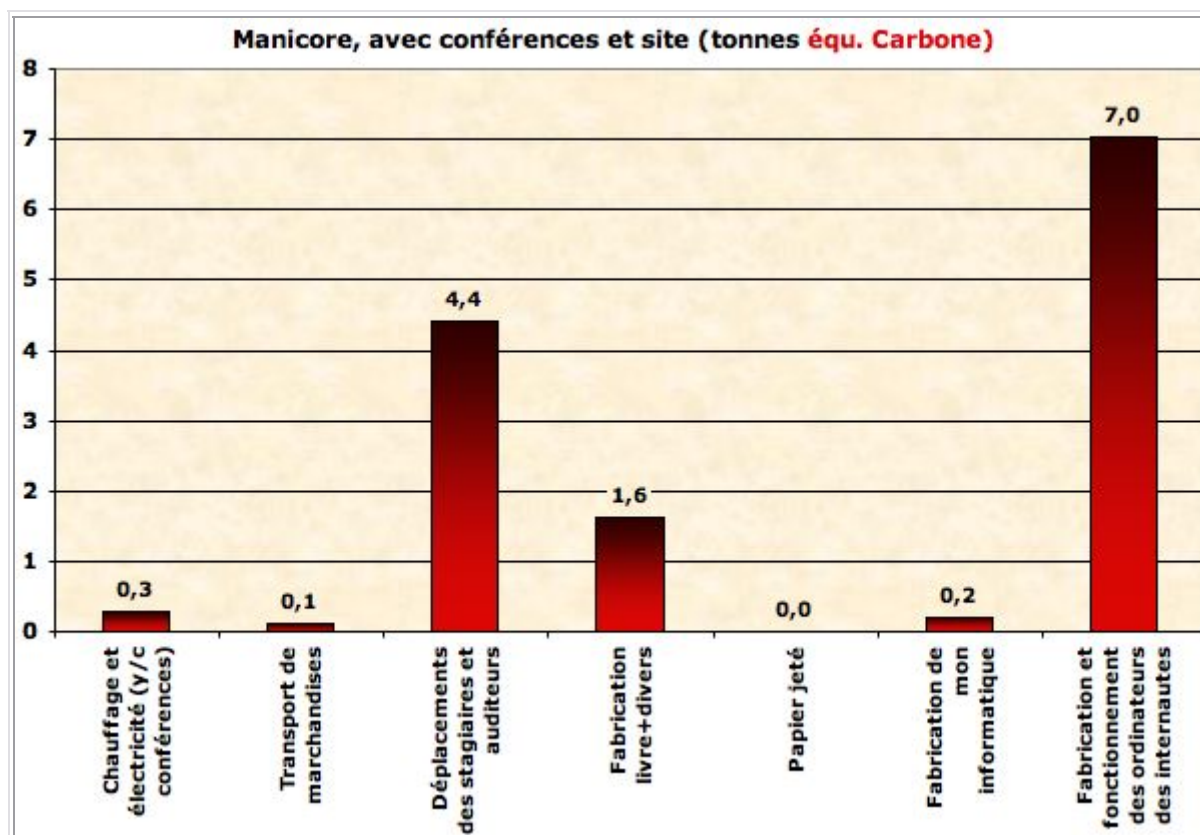
Mais mon métier, on peut le prendre au sens large, en incluant :

➤ les livres dont je suis auteur ou co-auteur : fabriquer ces derniers requiert du papier, et a donc "pollué le climat" via l'énergie utilisée par les papeteries ; il a fallu imprimer, ce qui a "pollué le climat" via la fabrication des encres par l'industrie chimique et l'énergie utilisée par les presses ; il a fallu acheminer le papier du papetier chez l'imprimeur, puis de chez l'imprimeur chez le libraire, et tout ceci a consommé du camion donc du gasoil, et si mes ouvrages sont commandés sur Amazon ou fnac.com il faut encore du camion pour aller de l'entrepôt de cette société jusque chez vous (quand ce n'est pas de l'avion !). Pour 10.000 livres achetés dans l'année (ce qui sera l'ordre de grandeur en incluant [Le plein s'il vous plait](#) + [L'Avenir Climatique](#) + [L'effet de serre](#) et en ne comptant que 50% pour les livres dont je suis co-auteur), et à raison de 200 g de poids moyen par livre, me voici crédité d'un surplus d'environ 1,5 tonnes équivalent carbone pour l'ensemble,

➤ Les conférences que je donne ([environ 60 par an](#)) : cela suppose que j'occupe une salle chauffée l'hiver, climatisée l'été, et éclairée dans tous les cas de figure (allez, à la louche, 200 kg équivalent carbone), et que les personnes qui y assistent soient venues dans la salle. Avec 6.000 personnes à qui je cause dans l'année, on va dire que cela a engendré le déplacement de 2.000 voitures sur 30 km pour l'aller-retour (car mes auditeurs mettent souvent un malin plaisir à venir m'écouter en voiture), et, lors de certaines formations, j'ai aussi quelques personnes qui ont pris un vol intérieur pour venir s'entendre dire que ce n'était pas terrible. Au total j'hérite à nouveau d'environ 4,5 tonnes équivalent carbone,

➤ Le [site](#) que vous êtes en train de consulter : il faut compter l'électricité qui alimente votre ordinateur, et surtout la fabrication de ce dernier. Allez, le meilleur est pour la fin : avec 1.000.000 de visites annuelles (extrapolation de mes stats de consultation des 3 derniers mois), à raison de 5 minutes par visite en moyenne (et je me demande si je ne suis pas optimiste sur la durée moyenne de visite de mon site !), d'une répartition 50/50 entre la France et l'étranger (car [la partie en anglais](#) est consultée aussi), et d'un internaute qui dispose d'un ordinateur de 100 watts de puissance utilisé 1500 heures dans l'année, j'hérite de 0,5 tonne équivalent carbone liée à la consommation électrique de mes internautes, et surtout... de 6,5 tonnes équivalent carbone d'émissions de fabrication des ordinateurs que vous utilisez (au prorata de leur utilisation pour regarder mes pages par rapport à tout le reste).

Putentrailles ! Morbleu ! Fouchtra ! Voyez comme le monde est cruel : je crois bien faire en causant à tout va, et voici que le premier résultat de l'affaire est d'engendrer une "pollution climatique" bien supérieure à ce qu'elle serait si je me tenais tranquille...



Bilan Carbone de Manicore, en tonnes équivalent carbone, en incluant les conférences et formations, et la consultation de ce site. Le chauffage regroupe mon bureau et les salles occupées pour les conférences, les transports de marchandise incluent ce qui est lié à mes livres, mais il est clair que le poste dominant devient ce qui est lié à mes conférences, et encore je n'ai pas calculé ce que j'ai engendré pour les rares fois où j'ai eu droit à la télé, en fabrication de téléviseurs et consommation de courant !

Mon "empreinte globale" passe à 14 tonnes équivalent carbone, soit près de 30 fois ce qui est lié à ma seule activité de conseil.

On s'arrête là, ou on continue ?

L'ironie de l'affaire ne s'arrête pas là : Manicore a des clients, donc gagne de l'argent. Une partie de cet argent est reversée au Trésor Public, sous forme d'impôts (TVA comprise), qui vont servir à alimenter des instituteurs et professeurs (qui se déplacent en voiture et occupent des locaux chauffés, donc engendrent des émissions), des médecins et infirmières (qui font de même), des constructeurs de route, et encore des fonctionnaires du ministère du tourisme qui vont inciter les Américains, les Japonais et les Chinois à venir chez nous (et il y a peu de chances qu'ils viennent en vélo ou en kayak de mer). Le secteur public engendre donc des émissions, directement et indirectement, et en payant des impôts j'en "achète" une petite partie. Mais comment déterminer ce qui me revient ? Au prorata de ce que je paye comme impôts, ou au prorata de ce que j'utilise comme individu ? est-ce que je gagne une "décote" si je vote pour quelqu'un qui promet de faire baisser les émissions de l'Etat ?

Et puis il y a un problème encore plus cornélien à résoudre : l'argent que je gagne, qu'en faire ? Si Manicore le dépense, cela engendre des émissions pour la fabrication de ce qui est consommé. Mais si cet argent est épargné, il engendre aussi des émissions : en épargnant, je favorise des activités (nécessairement émissives) de quelqu'un d'autre ! Si j'achète des actions ou des obligations, je favorise l'activité de l'entreprise qui a émis les actions, et si j'achète des titres émis par l'Etat, c'est l'activité de l'Etat que je favorise, comme en payant des impôts. Que dois-je compter pour cela ? Quelque chose, c'est sûr, mais quoi exactement, c'est une autre paire de manches...

Un bilan, c'est plus et moins

Heureusement pour moi, il va sûrement se trouver une bonne âme pour me faire remarquer que, certes, je crache du CO₂ à tout va, mais que, grâce à mon agit-prop, j'enclenche de salutaires envies d'économies chez les autres. Vrai, ou pas vrai ?

Il est clair que 14 tonnes équivalent carbone, ce n'est "jamais" que les émissions de 7 français(es). Or mon activité touche par la force des choses des milliers de personnes de manière approfondie : 6.000 auditeurs à [mes conférences tous les ans](#), et 10.000 à 20.000 lecteurs de mes [\(co-\)livres](#) (souvent les mêmes, au demeurant), sans parler de ceux à qui je "cause" de manière plus distante, à travers ce site, des tribunes publiées, ou des brefs passages dans les media grand public.

Si je parviens à engendrer 1% d'économies chez ces gens là (ce qui reste hypothétique, et parfaitement invérifiable), cela fait l'équivalent des émissions de 60 Français(es) : le bilan devient alors positif, et la morale de l'histoire est sauvée. Mais... mes auditeurs seront peut-être sujets à des effets de report : ils utiliseront moins la voiture, mais s'achèteront un peu plus de vestes et de jupes avec l'argent économisé. Or tout ce que nous consommons "pollue le climat", vestes et jupes comme le reste : il faut cultiver le coton ou fabriquer les fibres synthétiques, ce qui émet des gaz à effet de serre, puis tisser, transporter, vendre, éventuellement payer des pages de pub dans les magazines, etc, et tout cela émet aussi. Incidemment, notez bien que je viens d'enfoncer Reiser et le professeur Choron, en justifiant que la playmate du mois est écolo, puisque je viens en effet de démontrer mathématiquement qu'il faut vous promener tous nus pour sauver le climat ; à bon entendeur salut ! Plus sérieusement, avec ces effets de report, comment faire un bilan net de l'affaire ?

Tout comme pour Manicore, les "convaincus" peuvent aussi ne plus dépenser cet argent, et alors ils le placeront en bourse. Tout dépendra alors du fait qu'il achètent Areva (horreur ! ignominie ! abomination !), ou pour faire plus politiquement correct des titres Vesta, ou qu'il souscrivent à la "privatisation" d'Autoroutes du Sud de la France.. (qui soit dit en passant fait moins hurler qu'Areva, comme quoi le monde est encore loin de considérer la menace climatique à sa juste mesure).

Mais mon activité d'endoctrinement ne se limite pas aux consultants de mon site et lecteurs de mes (co-)ouvrages : j'ai aussi mon activité professionnelle, c'est-à-dire du [Bilan Carbone](#) à tire-larigot. Le même raisonnement que ci-dessus va néanmoins devoir être tenu : est-ce que je parviens à leur faire économiser le moindre kg équivalent carbone ? Ce que mes clients n'émettent plus, si cela se produit, est-ce un gain réel pour la collectivité, ou un simple effet de report, "quelqu'un d'autre" se chargeant d'émettre un peu plus à leur place grâce aux capacités libérées ?

Un esprit chagrin pourrait me faire remarquer, avec raison, que si la consommation est globalement croissante, alors tout ce que mes auditeurs et clients économisent quelque part, quelqu'un d'autre - ou eux-mêmes - le compensera et au-delà ailleurs. Alors, dans cette affaire, si j'estime que mon activité est *in fine* utile, c'est un vœu pieu, ou la vérité... ?

Optimiste, ou pessimiste ?

février 2005

La première réaction de quelqu'un qui découvre l'[ampleur des changements à faire pour apporter une solution volontaire au problème du changement climatique](#) est souvent de penser que "nous n'y arriverons jamais", tellement cela suppose de changements d'habitudes, d'efforts, voire de "renoncements". Tocqueville lui-même, bien qu'ayant vécu avant l'apparition de la voiture et du chauffage central, pensait que [les démocraties étaient myopes](#), rendaient les hommes (et les femmes) perpétuellement insatisfait(e)s de leur sort, et que, toutes entières consacrées à leur grande affaire, qui est de faire du commerce (donc de gagner de l'argent) et de satisfaire une consommation de masse, ces systèmes politiques sont incapables de prévenir les dangers de long terme.

Une telle conclusion n'incite assurément pas à l'optimisme : si les systèmes démocratiques réagissent toujours "trop tard" face aux problèmes qui sont globaux et inertes (donc irréversibles à bref délai), sans urgence à court terme, alors nous sommes assurément "fichus" face au changement climatique. Toutefois, la conclusion de Tocqueville n'est pas une "loi" : il s'agit plutôt de caractériser un penchant des systèmes démocratiques que d'édicter une règle absolue, et de temps en temps d'autres éléments permettent de faire naître un soudain espoir. Tel le magistrat devant dire qui a raison, est-il possible de faire la part des choses entre les éléments qui incitent à l'optimisme, et ceux qui incitent au pessimisme ?

En fait, le premier d'entre eux est probablement... notre patrimoine génétique ! Il y a en effet des personnalités optimistes, perpétuellement entreprenantes, solidement enracinées dans la vision en rose, parfois tellement que cela en devient de l'inconscience, et la vie permet aussi de croiser des grincheux(ses) professionnel(le)s, trouvant toujours une bonne raison de se plaindre, et pensant systématiquement que les choses vont aller de mal en pis.

Si nous essayons de trouver des raisons de désespérer de l'humanité dans cette affaire, il y en a bien sûr quelques unes :

➤ le plus frappant pour moi, peut-être, est le fait que bien des individus qui militent en faveur d'une meilleure prise en compte du "danger climatique" (enfin ceux que je connais) sont facilement les premiers à consommer plus d'énergie que la moyenne, alors que certains comportements très "payants" ne devraient pas être un problème pour des gens motivés. L'archétype de cet exemple est l'avion (alors que l'[avion démocratique n'est en rien compatible avec une solution au problème](#)) : je me demande si je ne suis pas le seul "militant du climat" à ne pas être monté dans un avion au cours des 2 ou 3 dernières années ! Et les motifs invoqués

pour ne rien changer aux habitudes sont très exactement ceux reprochés aux autres : "c'est pour mon boulot, et je ne peux pas faire autrement", "cela coûte trop cher de prendre le train", ou tout simplement "je n'en ai pas envie". Mais si "ceux qui savent et militent" ne sont pas capables de faire des efforts, au motif que cela ne leur est pas possible et/ou facile et/ou qu'ils n'en ont pas envie, au nom de quoi "les autres" (les industriels, les américains, les chinois, les autres français, etc) le pourraient ? Un tel comportement ne signifie-t-il pas la faillite de tout raisonnement qui voudrait que "lorsque les gens sauront, ils feront des efforts" ?

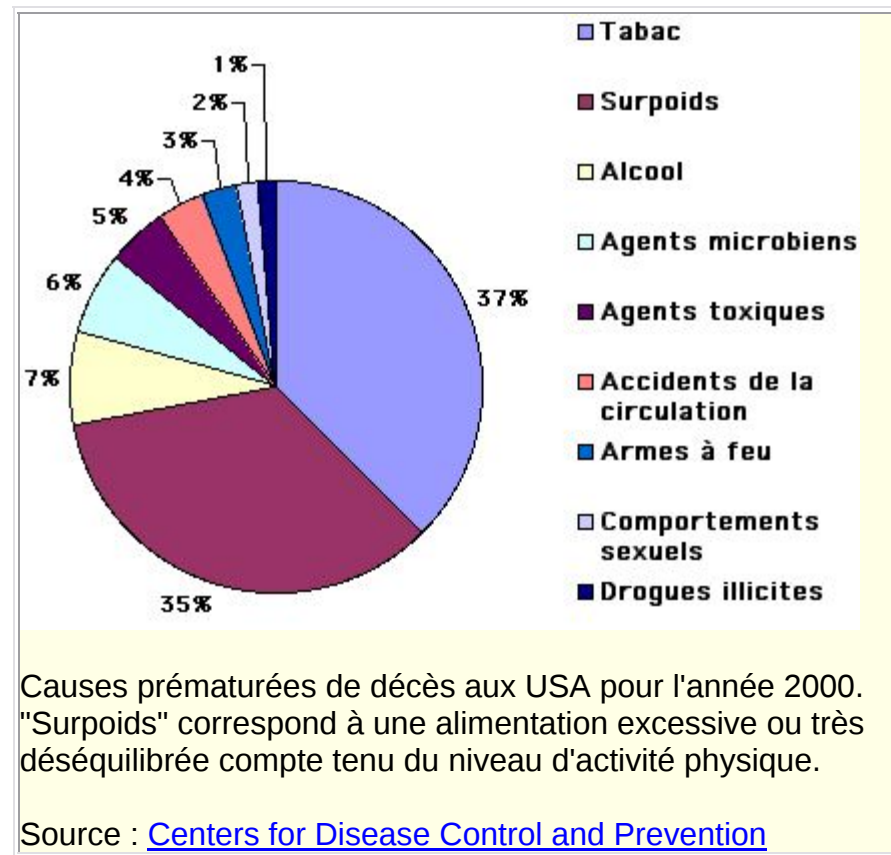
➤Le fait que personne ne considère qu'il gaspille (c'est aussi souvent vrai chez les militants). En effet, la seule définition du gaspillage que j'ai pu trouver à ce jour est : "un(e) gaspilleur(se) est celui(elle) qui consomme plus que moi". Ce n'est malheureusement pas avec ce genre de définition que nous allons trouver une solution volontaire au problème !

➤Le fait que 85% des français sont aujourd'hui opposés à une hausse de la fiscalité sur les carburants (et sur l'énergie en général nous aurons probablement des résultats voisins), alors que [sans cela il semble impossible d'envisager une solution volontaire au problème](#),

➤La proportion impressionnante de mes compatriotes qui ne fait même pas l'effort de descendre les marches d'un escalator (ne parlons même pas de les monter !), pour éviter un effort qui est ridicule, ou qui prend l'ascenseur pour descendre 2 étages ou en monter un : quand on voit ce genre de choses, cela rend perplexe quant à la possibilité d'imaginer que ces personnes puissent fournir des efforts significatifs dans un autre contexte...

➤Dans le même esprit, la proportion significative de mes compatriotes qui n'envisage même pas de se garer à plus de 10 mètres du lieu de destination lorsqu'ils circulent en voiture, n'hésitant pas à garer leur véhicule sur le trottoir alors que des places autorisées sont libres 30 mètres plus loin.

➤La majorité des fumeurs(euses) qui n'arrivent pas à cesser de fumer, ou de personnes trop grassouillettes de trop manger, alors que le tabac et l'obésité sont devenues deux causes majeures de mortalité prématurée (aux US ce sont même les deux premières causes de mortalité prématurée). "On" le sait, et pourtant "on" ne parvient pas à - ou ne veut pas - changer d'habitude, combien néfastes ces dernières puissent être. Là aussi, cela rend perplexe sur la possibilité d'un changement volontaire d'habitude dans d'autres domaines...



➤ [L'incapacité des médias à en parler beaucoup et bien](#), or comment penser que la population peut être motivée si elle ne sait même pas qu'elle va devoir faire un effort important de manière non négociable ? La meilleure preuve que le rôle des médias est essentiel pour "faire" l'opinion est apportée par ce qui se passe lorsqu'un régime totalitaire prend le pouvoir : la première mesure prise est celle de la censure (ou de la prise de contrôle des médias), et la deuxième la nomination d'un ministre de la propagande, preuve s'il en était besoin que le contrôle de l'information est un élément essentiel pour orienter le comportement de la population (ce qui, soit dit en passant, est une forme de réponse à mon interrogation sur l'utilité de la vulgarisation !).

➤Le fait que la solution volontaire au problème n'est pas compatible avec une croissance indéfinie de la consommation matérielle, alors que cette recherche de croissance indéfinie est un déterminant perpétuel de l'action humaine.

Malgré ce qui précède, il existe quand même des éléments qui incitent à l'optimisme :

➤Le fait que dans le passé il y ait eu des époques où "les gens" étaient prêts à aller se faire tuer (les guerres), alors que cela représente quand même un niveau de contrainte quelque peu supérieur à celui d'isoler un appartement ou une maison, moins rouler en voiture et dans une voiture plus petite, partir en vacances moins loin, avoir moins la possibilité d'acheter des produits manufacturés de toute sorte, et manger moins de viande !

➤Une règle bien connue veut que l'effort soit plus acceptable quand il est partagé par tous : ainsi, certains efforts que personne ne veut faire seul deviennent tolérables quand on demande à tout le monde de s'y coller. Quelques exemples d'une telle évolution peuvent être les suivants :

►le degré d'acceptation d'une contrainte est bien plus élevé dans le milieu professionnel que lorsque chacun est chez soi, parce que la contrainte est immédiatement la même pour tous (il est aussi vrai qu'il est moins facile de ne pas la respecter sans gros risque financier, et que par ailleurs le patron n'est pas élu par ses salariés !). Ainsi, dans le milieu professionnel, on peut imposer de ne plus prendre l'avion - cela a été en vigueur dans certaines sociétés après le 11 septembre 2001 - ou de mettre un uniforme, toutes choses qui y sont acceptées si la raison en est suffisamment explicitée. On pourrait donc imaginer que si la contrainte est bien exposée, par un dirigeant suffisamment "fort", et l'effort instantanément réparti, ce dernier soit accepté...

►A force d'avoir répété que le tabac était mauvais pour la santé, une majorité de français s'est déclarée favorable aux hausses de prix du tabac, ou encore à l'éradication progressive des lieux où il est permis de fumer (entreprises, trains...), et dans le lot il y a bien sûr des fumeurs ! Or autant les discours n'ont eu que peu d'effets, autant la hausse des prix qu'ils préparent est elle efficace,

►toujours dans le même esprit, une majorité de français déclare qu'elle est favorable à un bridage en usine de la vitesse maximale des véhicules automobiles pour favoriser les économies d'énergie,

➤Le fait que lorsque l'on prend 4 heures de son temps pour expliquer en long, en large, et sûrement pour partie de travers, les problèmes qui se posent avec le [changement climatique](#) et les énergies fossiles ([dont le pétrole](#)), alors la taxation des combustibles fossiles devient une conclusion "logique" pour beaucoup (enfin c'est mon expérience de conférencier !). J'ai constaté que la question qui se pose alors est beaucoup moins "faut-il taxer" que "comment taxer de manière équitable ?". En conclusion de ce qui précède, à supposer que la finalité en soit clairement exposée de manière large (ce qui n'est assurément pas le cas pour l'instant), ne pourrait-on alors se prendre à rêver que les européens (pas seulement les français) acceptent majoritairement une [hausse progressive de la fiscalité sur les énergies fossiles](#) ??

Alors, optimiste ou pessimiste ? Eh bien.... ne serait-ce pas essentiellement une affaire de gènes ?

Existe-t-il des énergies sans CO₂ ?

dernière modification : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Malgré que la presse explique parfois qu'il existe des énergies "propres", cette question est beaucoup moins simple qu'il n'y paraît. En effet, pour "faire" de l'énergie (en fait l'énergie ne se "fabrique" pas, elle peut juste se transformer), il faut non seulement disposer d'une source d'**énergie primaire** (c'est à dire une source que nous trouvons "telle quelle" dans la nature, comme par exemple le charbon, le pétrole, le soleil, le vent, un élément fissile...), mais également construire le dispositif qui permettra de transformer cette source d'énergie primaire en quelque chose qui soit utilisable par nous (chaleur, électricité, mouvement). De tels dispositifs sont par exemple une centrale électrique à charbon, une éolienne, une centrale nucléaire, etc.

Quelles sont les sources d'[énergie](#) primaire à notre disposition ?

➤Le charbon : c'est un mélange d'éléments minéraux, de soufre, et de carbone presque pur, et sa combustion dégage donc du CO₂,

➤Le pétrole : c'est un [composé de diverses molécules](#) comportant essentiellement du carbone et de l'hydrogène. Sa combustion dégage donc aussi du CO₂, mais 25% de moins que le charbon à énergie égale (car la combustion de l'hydrogène fournit de l'énergie mais engendre uniquement de l'eau)

➤Le gaz naturel : c'est aussi un hydrocarbure, comme le pétrole, mais c'est celui qui est le moins "carboné" de tous (et le plus riche en hydrogène). Toutefois sa combustion dégage encore du CO₂ (40% à 50% de moins que le charbon à énergie égale, mais ce n'est pas zéro !).

➤La désintégration atomique (énergie nucléaire),

➤Le vent (énergie éolienne)

➤Le rayonnement solaire (énergie solaire)

➤L'eau en mouvement (énergie hydroélectrique ou mécanique, comme dans les anciens moulins)

➤La marée.

➤La géothermie, c'est à dire la chaleur provenant des entrailles de la terre.

➤La biomasse (les plantes), qui nous fournissent des composés comportant essentiellement du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène. Leur combustion dégage donc du CO₂. On a tendance à dire que c'est une source renouvelable à l'égal des autres sources renouvelables parce qu'on peut en replanter, et qu'elle est climatiquement neutre parce que les émissions de CO₂ effectuées au moment où la biomasse (bois, biocarburant, paille...) brûle sont compensées par la photosynthèse d'autres plantes en train de pousser. Une telle affirmation peut être vraie ou fausse :

➤on peut effectivement renouveler la ressource, en replantant des arbres ou des plantes (colza, blé),

➤si la fraction de la biomasse qui est brûlée représente exactement l'accroissement naturel de ce qui est planté, effectivement l'impact sur le climat est neutre (on a l'absorption d'un côté qui équilibre les émissions de l'autre),

➤mais lorsqu'on brûle du bois sans le replanter (ce qui est le cas pour une large partie du bois brûlé, essentiellement dans les pays du tiers monde) alors il ne s'agit plus du tout d'une énergie renouvelable, puisque la plantation n'est pas renouvelée, ni d'une énergie "sans CO₂", puisque son usage [engendre au contraire des émissions supplémentaires](#). On comprendra mieux, en lisant ces

quelques lignes, toutes les difficultés que les pays ont à se mettre d'accord sur la manière de prendre le bois en compte dans les [négociations internationales](#)....

Plus généralement, certaines formes d'énergie primaire sont renouvelables, c'est à dire qu'elles se renouvellent en permanence, d'autres non (elle sont alors [sujettes à épuisement, comme le pétrole par exemple](#)). Toutes les sources renouvelables sont plus ou moins des dérivés de l'énergie solaire (même la marée : c'est l'attraction du soleil qui prédomine !), sauf la géothermie :

- l'énergie éolienne, c'est à dire du vent, vient des différences de température (sous l'effet du soleil), donc de pression, entre masses d'air,

- l'énergie hydraulique, venant des rivières, est une conséquence de la pluie, elle-même provoquée par l'évaporation sous l'effet du soleil,

- la biomasse résulte de la photosynthèse (encore le soleil).

- et même le charbon, le gaz et le pétrole sont renouvelables....[si nous pouvons attendre des millions d'années](#) ! Mais comme nous sommes en train de [tout brûler en quelques siècles](#), bien évidemment, à cette échelle, ces ressources ne sont pas renouvelables. Et il s'agit ici aussi d'un dérivé, sous forme concentrée, d'énergie solaire, très ancienne il est vrai.

La géothermie est pour sa part une conséquence de la radioactivité naturelle des roches terrestres, donc ne provient pas directement de notre soleil. Le flux annuel est très faible : à peu près l'équivalent de la consommation annuelle d'énergie de l'humanité (mais réparti sur toute la surface de la terre), soit 1/10.000 è de l'énergie qui provient du Soleil. Par contre ce flux, qui existe depuis très longtemps, a accumulé de considérables quantités de chaleur dans le sous-sol profond et ce stock de chaleur pourrait être exploité pendant très longtemps sans que la température ne baisse beaucoup.

Bien qu'il ne s'agisse donc pas d'une énergie renouvelable, le stock est tellement immense que c'est "presque comme si". Ce raisonnement est également valable pour deux formes d'énergie nucléaire, qui ne sont pas des énergies renouvelables mais qui puiseraient dans un stock tellement immense que ce serait "comme si" :

- la "surgénération" (dont Superphénix en France était un exemple), qui peut utiliser tout l'uranium (la filière actuelle n'en utilise que 0,5% ; l'isotope 235 très minoritaire) ou le thorium, avec des stocks tels que nous en aurions pour des milliers ou dizaines de milliers d'années,
- la fusion, si nous arrivons à la mettre au point un jour (ce n'est de toute façon pas avant 50 à 100 ans disent les spécialistes de la chose, donc il va falloir faire sans pour le siècle à venir).

Energie et gaz à effet de serre

Dans toutes ces sources exploitables, certaines émettent des gaz à effet de serre lorsque nous les utilisons et d'autres très peu. Les sources d'énergie primaire qui émettent des [gaz à effet de serre](#) (en fait du gaz carbonique - CO₂ - pour l'essentiel) sont :

- le charbon,
- le pétrole,
- le gaz,
- le bois si il n'est pas replanté (cas des pays tropicaux)

Parmi les procédés dont la source d'énergie primaire ne produit pas de CO₂ on trouve :

- toutes les formes d'énergie nucléaire,
- l'hydroélectricité (encore que les lacs de barrage sous les tropiques émettent un peu de méthane, qui est un [gaz à effet de serre](#), à cause de la décomposition des débris végétaux dans le lac),

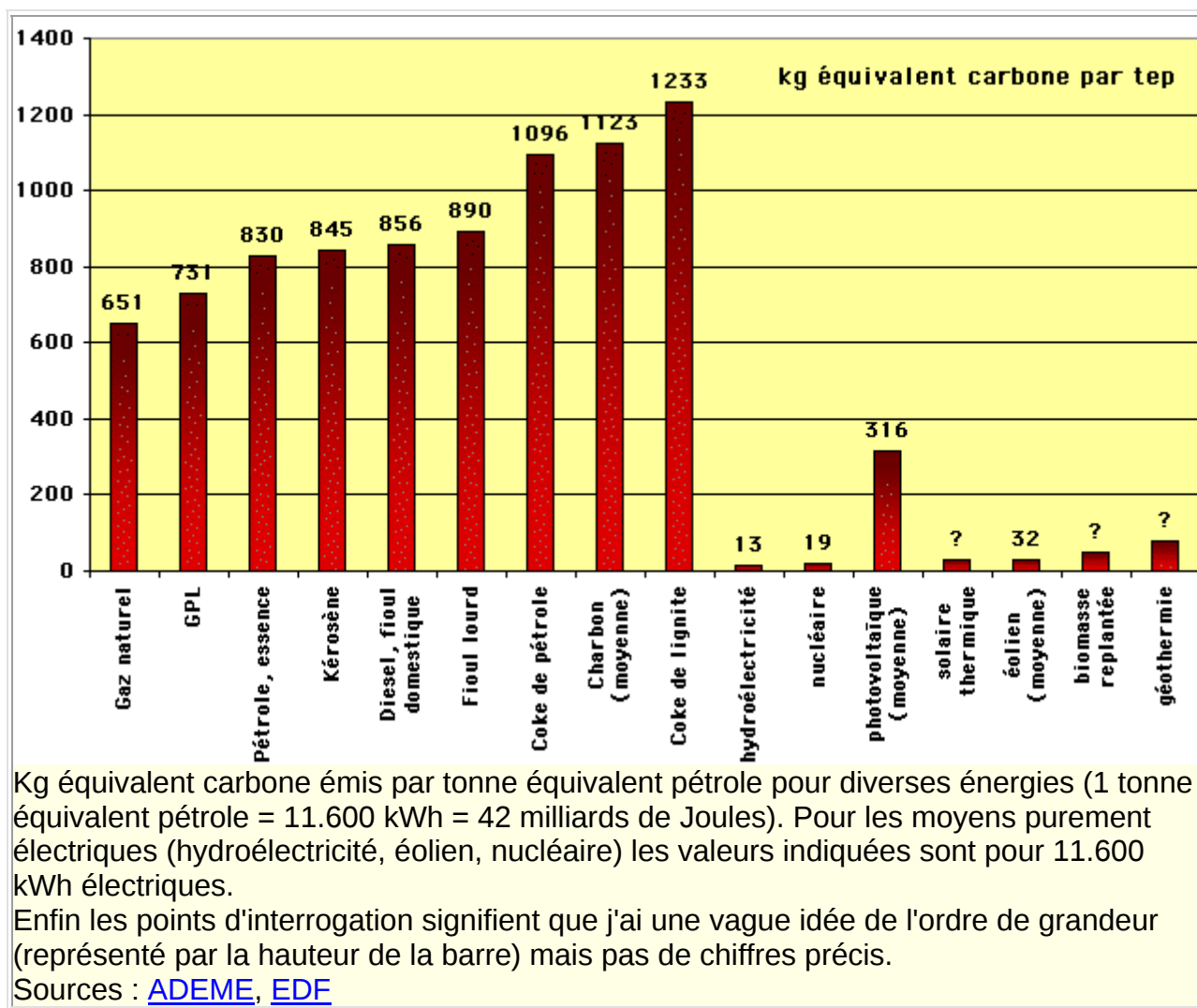
- le rayonnement solaire,
- le vent,
- l'énergie marémotrice,
- la géothermie,
- la biomasse si elle est replantée.

Qu'est-ce que le cycle de vie ?

Mais pour certains procédés, si la source d'énergie primaire ne produit pas de [gaz à effet de serre](#) (en particulier pas de CO₂), la construction de la "centrale" en aura produit :

- pour faire une centrale (à charbon, nucléaire, à gaz, à pétrole, ou un barrage), il faut des matériaux de construction, dont du ciment et de l'acier, dont la production engendre des émissions de [gaz à effet de serre](#), notamment de CO₂,
- pour faire une éolienne ou un panneau solaire il faut des matériaux de base (aluminium, verre, etc) ou plus élaborés (semi-conducteurs), dont la fabrication émet des [gaz à effet de serre](#),

Si l'on intègre ces "émissions intermédiaires" dans le total (cela s'appelle faire un cycle de vie, comme on le fait aussi pour d'autres polluants), on peut arriver à un "total d'émission" qu'il a fallu envoyer dans l'air pour disposer d'une quantité d'énergie finale donnée (l'énergie finale est celle qui est disponible pour nos usages : essence raffinée, électricité, gaz pour la cuisinière, etc). On constate alors que, face aux énergies "fossiles" qui émettent beaucoup de gaz carbonique lors de leur usage, il existe des énergies moins émettrices (mais jamais totalement non émettrices) que l'on désigne parfois, de manière un peu raccourcie, "sans CO₂" (graphique ci-dessous).



Pour le cas particulier de l'électricité, cela donne ce qui est dans le tableau ci-dessous.

Cas de la production d'électricité : émissions de CO₂ en g/ kWh (analyse du cycle de vie)	
charbon	800 à 1050 suivant technologie
cycle combiné à gaz	430 (°)
nucléaire	6
hydraulique	4
biomasse bois	1500 sans replantation
photovoltaïque	60 à 150 (*)
éolien	3 à 22 (**)

Source : Jean-Pierre BOURDIER, [La Jaune et La Rouge de Mai 2000](#)

(°) j'ai reproduit le tableau de l'article, mais en toute rigueur pour le gaz j'aurais du mettre 400 à 500 ; toutes les technologies ne sont pas également efficaces !

(*) le CO₂ provient surtout de la fabrication des cellules des panneaux, mais aussi de la batterie qui stocke l'électricité la nuit. Suivant que ces panneaux sont fabriqués au Danemark (électricité très majoritairement au charbon) ou en Suisse (électricité quasi totalement nucléaire et hydraulique), le contenu en CO₂ est très différent. L'amortissement se fait en 20 à 30 ans suivant les variantes. Toutefois en "cycle fermé", c'est à dire en utilisant tout le long du cycle (fabrication, transport, etc) le plus possible d'énergies à "zéro émission intermédiaire", et avec des technologies "sobres" pour la fabrication (de type couches minces) on arriverait probablement à bien moins.

(**) suivant lieu de fabrication, idem ci-dessus.

En résumé, les énergies qui n'émettent pas ou peu de gaz à effet de serre pour leur usage, si l'on prend en compte l'ensemble du cycle, sont :

►Le nucléaire et l'hydroélectricité aujourd'hui,

- Le [solaire thermique](#) aujourd'hui, qu'il soit destiné à faire de l'eau chaude dans les maisons, ou de la vapeur dans une centrale à concentration,
- Le solaire photovoltaïque demain, quand les panneaux seront eux-mêmes produits avec de l'électricité d'origine nucléaire, solaire ou hydroélectrique). Un petit calcul sur le potentiel de cette énergie est [disponible ici](#)
- L'éolien, mais le potentiel est très limité avec la consommation d'énergie que nous avons aujourd'hui (voir pourquoi sur [la page sur l'éolien](#)),
- La biomasse (bois de chauffage, bio-carburants, etc), mais :
 - ▶ les biocarburants peuvent présenter un bilan global en gaz à effet de serre qui n'est pas satisfaisant, car d'une part il faut le plus souvent consommer de l'énergie fossile pour cultiver les plantes (essence du tracteur et fabrication des engrais par l'industrie chimique), ensuite il y a des émissions de [protoxyde d'azote](#) lors de l'épandage des engrais, et enfin il peut y avoir des émissions de [méthane](#) et d'oxydes d'azote lors de la combustion du biocarburant qui sont supérieures à celles obtenues en brûlant du pétrole.
 - ▶ les biocarburants sont en outre très [consommateurs d'espace](#), car leur rendement énergétique net à l'hectare n'est pas très élevé,
 - ▶ le bois de chauffage est toujours intéressant en utilisation locale, mais je ne sais pas ce qu'il en est quand on doit le transporter sur de longues distances.

La voiture électrique est-elle la panacée ?

septembre 2000 - révisé septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Cela fait déjà quelques temps que la voiture électrique est volontiers considérée comme une solution à bien des problèmes, et notamment aux deux nuisances le plus souvent évoquées lorsque l'on parle de transports :

- pas de bruit

➤ pas de pollution en apparence.

Or la réalité est hélas moins rose :

➤ l'absence de bruit est surtout valable à petite vitesse,

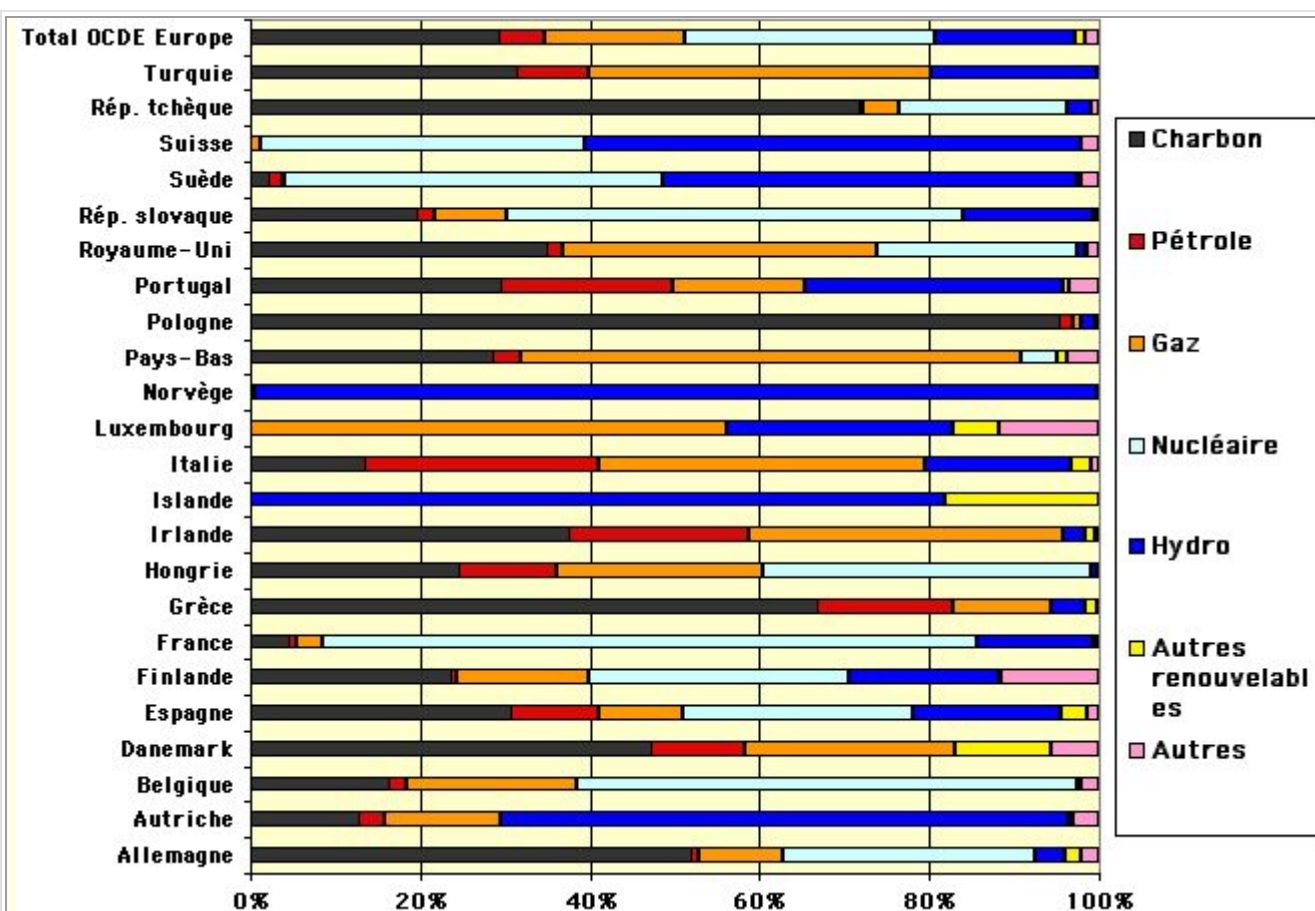
➤ le bruit des véhicules est pour l'essentiel du bruit de roulement dès que l'on dépasse 50 à 60 km/h, le bruit du moteur devenant alors secondaire,

➤ la petite vitesse suppose que l'on ne s'en serve qu'en ville, là où précisément les voitures nombreuses - électriques ou pas - engendrent d'autres problèmes, comme par exemple la congestion, la nécessité de disposer d'espaces importants pour la voirie et les parkings, etc, qui ne ne seraient pas résolus avec la voiture électrique,

➤ l'absence de pollution de la voiture électrique est une vue de l'esprit :

➤ l'électricité ne peut se produire de manière totalement propre, et la voiture électrique pollue exactement comme la centrale électrique qui a fait l'électricité.

➤ En particulier si l'électricité est majoritairement fabriquée avec du charbon, du pétrole ou du [gaz naturel](#), ce qui est le cas presque partout sauf en France, en Suisse et en Suède (cf. graphique ci-dessous), alors les émissions de CO₂ (gaz à [effet de serre](#)) sur l'ensemble du cycle sont supérieures ou égales à ce qui est engendré en consommant directement du pétrole. Cela est moins vrai avec du gaz (les émissions sont alors voisines, voire un peu inférieures, mais le gaz est de loin [la ressource fossile la moins abondante dans les réserves](#)).



Structure de la production d'électricité dans divers pays européens en 2001. Source : Ministère de l'Industrie, Observatoire de l'énergie.

Pour l'ensemble des pays de l'OCDE en Europe, l'électricité est faite pour 30% au charbon, 5% au pétrole, 16% au gaz, 30% avec des centrales nucléaires, 17% avec des barrages, and 3% d'une autre manière (ce qui comprend la géothermie, le solaire, l'éolien, etc). Un gros 50% de l'électricité européenne vient donc des combustibles fossiles. La moyenne mondiale d'électricité faite avec des combustibles fossiles est plus proche de 66%.

➤ Enfin électrifier toutes les voitures à parc constant suppose

➤ que l'on dispose, de par le monde, de quoi faire quelques centaines de millions de batteries (et 3 milliards si nous voulons une voiture par adulte en âge de conduire). Une telle vulgarisation serait-elle compatible avec les ressources existantes pour les matériaux nécessaires ?

➤ que l'on construise quelques centrales supplémentaires ! Faisons un calcul pour la France. La consommation actuelle des transports est de 54 Millions de tonnes équivalent pétrole (1 tonne équivalent pétrole = 11.600 kWh ; [voir définitions ici](#)), soit, à énergie finale constante, environ 600 TWh (1 Twh = 1 milliard de kWh). Certes la chaîne électrique est 2 à 3 fois plus efficace que le moteur à essence, et donc pour faire avancer nos voitures électriques il nous faut "juste" de 200 à 300 TWh pour électrifier 30 millions de voitures, soit de 40% à 60% de la production électrique française actuelle.

Si l'électricité est faite avec un combustible fossile, comme le rendement des centrales est de 50% aujourd'hui au mieux, et que la cogénération pose le problème de l'emploi simultané de la chaleur et de l'électricité (en mettre partout supposerait que nous n'ayons de l'électricité que l'hiver ou lorsque nous avons beaucoup d'industries consommatrices d'énergie !), nous aurions en fait besoin de 400 à 500 TWh d'énergie primaire pour fournir ces 200 à 250 TWh d'électricité.

"Tout électrique" signifie donc, en gros, une augmentation de 50% du parc de centrales en France, et si ces centrales fonctionnent aux hydrocarbures (gazeux, liquides ou solides) on ne gagne pas grand-chose question CO₂. C'est faisable, mais pas totalement anodin !

En conclusion penser qu'il faudrait massivement équiper les zones urbaines avec des véhicules électriques pour résoudre le problème de la pollution locale - ce qui est envisagé très sérieusement en Californie, par exemple - est

➤ proposer un remède pire que le mal si le pays concerné produit son électricité massivement à base de charbon (ce qui est le cas dans bien des Etats américains). Ce faisant, on évite bien sur une partie de la pollution urbaine - phénomène réversible à court

terme - mais au prix d'un accroissement de leur contribution à l'[effet de serre](#), phénomène [irréversible à l'échelle d'une vie humaine](#).

➤oublier une chose : la production additionnelle d'électricité est très loin d'être "dans l'épaisseur du trait" avec les puissances de voitures auxquelles nous sommes acoutumés (je ne dirais pas cela si on remplaçait toutes les voitures à essence par des vélos électriques !).

➤oublier que la congestion urbaine, qui provient uniquement de l'existence d'un grand nombre de véhicules individuels, ne disparaîtrait pas avec la voiture électrique. Ce constat est, dans une moindre mesure, aussi valable pour le bruit.

La voiture électrique est donc une idée aussi bonne que le contexte dans lequel elle prend place : électrifier le parc de voitures si celui-ci doit être divisé par 2, utilisé 4 fois moins, composé de véhicules à faible puissance, et alimenté avec de l'électricité produite de manière relativement propre ([solaire](#) ou [nucléaire](#)) est assurément une solution à étudier.

Mais prôner l'électrification massive du parc actuel (ou pire : à venir en prolongation tendancielle) en conservant une mobilité en voiture équivalente à celle que nous avons maintenant (ou pire : à venir en prolongation tendancielle) est par contre une "solution" qui ne fait que déplacer le problème initial, sans le résoudre.

Cette réflexion ne vaut pas pour les voitures dites hybrides, qui couplent un moteur thermique et un moteur électrique, et sont plus efficaces que les voitures à essence (parce qu'elle récupèrent l'énergie cinétique au freinage pour la convertir en électricité, et parce qu'elles fonctionnent sur le moteur électrique aux bas régimes moteur, là où le moteur à essence a un très mauvais rendement), car ces dernières ne nécessitent pas la construction de centrales supplémentaires. Mais ce procédé n'éradique pas pour autant tous les inconvénients : il faut encore de l'essence, même si c'est moins (et l'[essence n'est pas une ressource renouvelable](#)), et avec un [étalement urbain](#) croissant nous aurons une congestion croissante.

Pourrions nous vivre comme maintenant avec juste des renouvelables ?

date de dernière modification : septembre 2005

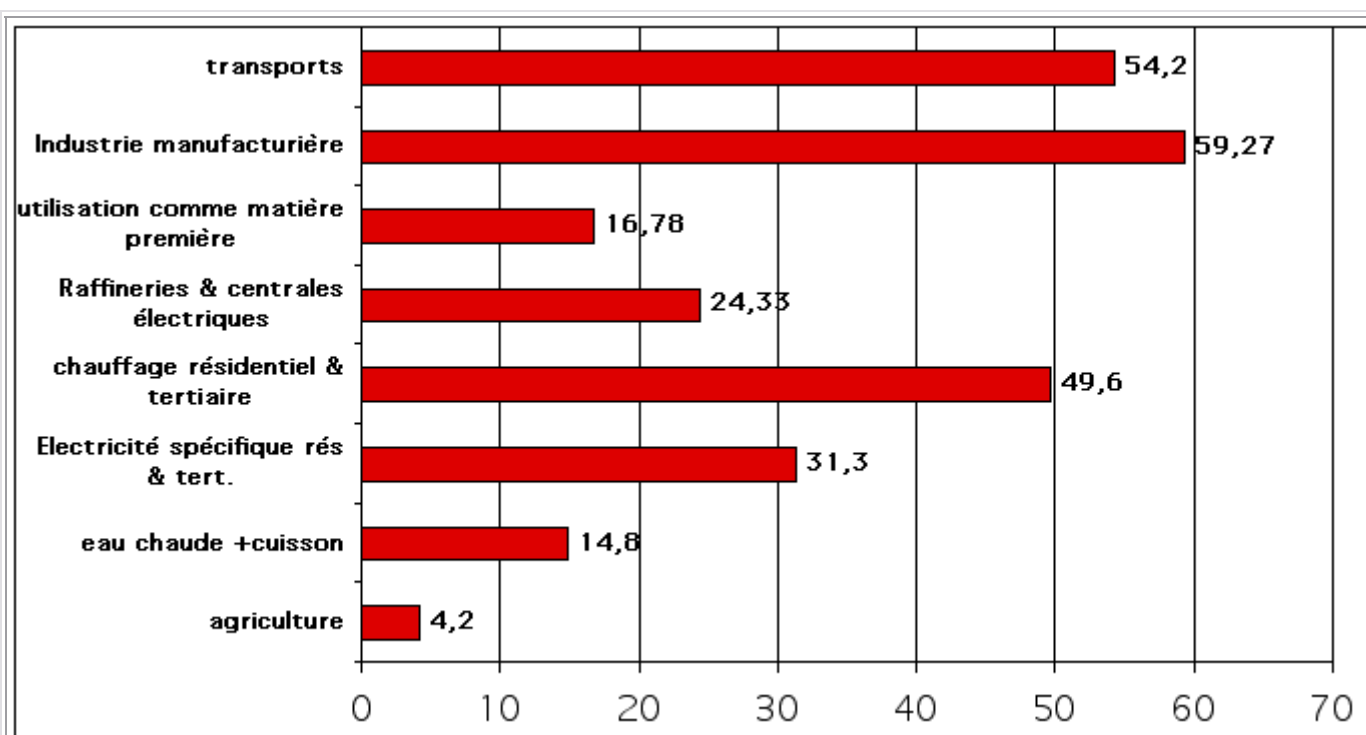
site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Ah, ce serait si beau.... fini les raffineries ou oléoducs qui explosent, les navires qui marénoirisent, le changement climatique, les terrils de mines de charbon, les centrales nucléaires et que sais-je encore : quelques éoliennes, quelques champs de colza, et hop ! tout le monde vit à peu près comme maintenant, heureux dans un monde débarrassé de ses problèmes. Est-ce théoriquement possible de permettre aux occidentaux que nous sommes de conserver un monde semblable à celui que nous connaissons avec juste des énergies renouvelables ?

Tout ce qui suit est basé sur mon retraitement personnel des statistiques françaises de consommation d'énergie (si vous êtes curieux les [explications se trouvent ici](#)).

Notre consommation d'énergie : de quoi s'agit-il au juste ?

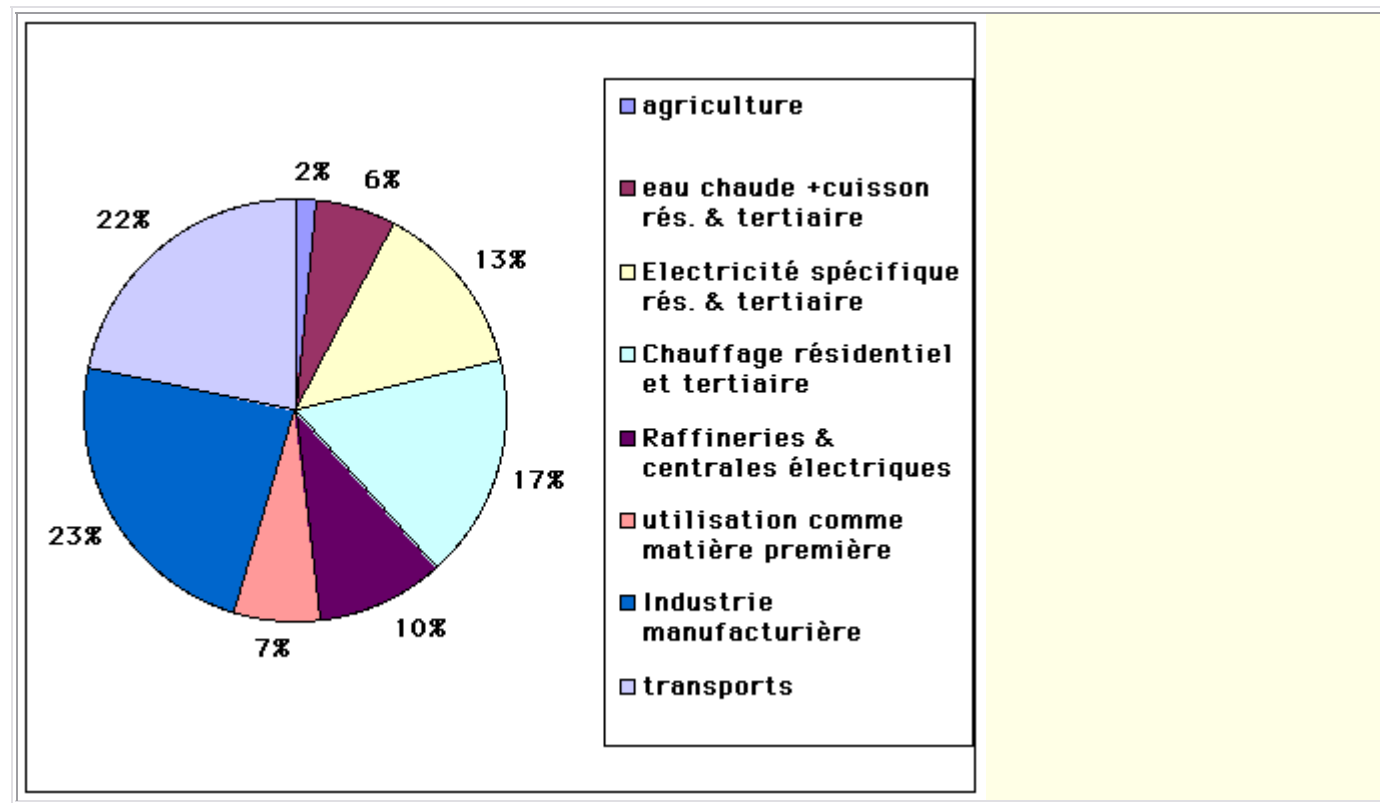
Demandez à n'importe lequel de vos voisins ce que signifie pour lui "économie d'énergie", et vous avez toutes les chances qu'il vous parle à peu près exclusivement d'ampoules basse consommation ou d'isolation des fenêtres. Est-ce à dire que l'essentiel de notre consommation d'énergie réside dans l'éclairage et le chauffage des maisons ?



Consommation d'énergie primaire par usage en millions de tonnes équivalent pétrole (en abrégé Mtep, voir [définition sur cette page](#)) en France en 1999. Source : Observatoire de l'Energie. L'ensemble représente environ 250 Mtep.

L'éclairage fait partie du poste "électricité spécifique résidentiel et tertiaire" et le chauffage est individualisé.

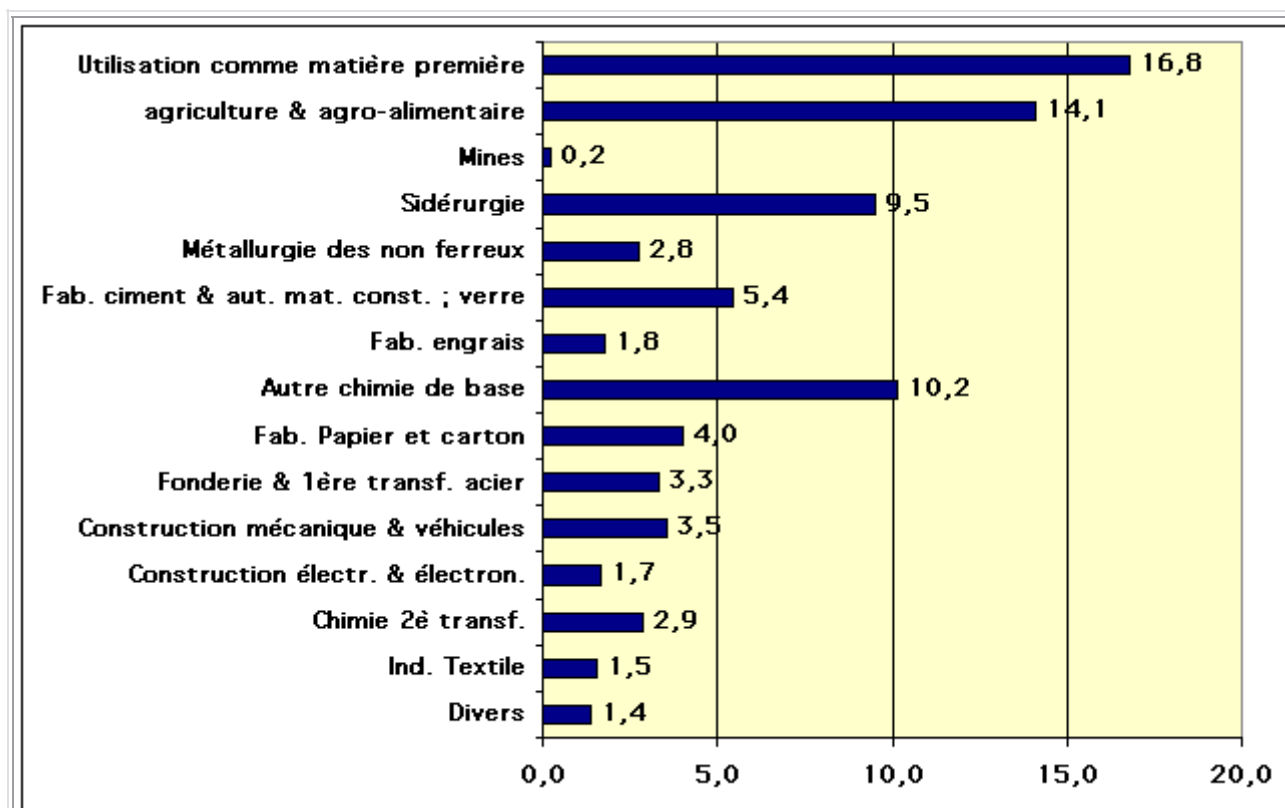
"Utilisation comme matière première" désigne les hydrocarbures qui ne sont pas brûlés mais utilisés comme matière première par la chimie pour fabriquer des produits divers (plastiques, lessives...). Le pourcentage du total correspondant à chaque usage se trouve sur le graphique ci-dessous.



Ce panorama d'ensemble permet de voir que nous consommons en fait de l'énergie à travers tous nos actes de la vie quotidienne (se déplacer, se loger, mais aussi acheter à peu près n'importe quel produit ou service), et si le chauffage n'est pas un poste négligeable, il ne fait que 20% de la consommation totale d'énergie, et quant à l'éclairage il représente moins de 1% de la consommation française. Tout le reste est représenté par "autre chose". Voyons ce que les renouvelables pourraient (ou pas) remplacer.

Industrie

On m'accusera de facilité : je commence par le plus facile à....écarter, malheureusement.



Répartition par secteur d'activité de la consommation d'énergie dans l'industrie et l'agriculture en France, en millions de tonnes équivalent pétrole (comprend à la fois l'utilisation comme matière première et comme source d'énergie pour les composés fossiles). Source : Observatoire de l'Energie. Le total représente environ 80 Mtep.

A partir du graphique ci-dessus et de données disponibles par ailleurs, il est possible de tirer quelques premières conclusions :

- ▶ C'est fabriquer les matériaux de base qui requiert énormément d'énergie : "utilisation comme matière première" (voir explications ci-dessous), sidérurgie, chimie de base, fabrication des matériaux de construction...absorbent bien plus de la moitié de la consommation de l'industrie. Les activités de transformation sont comparativement beaucoup plus sobres.
- ▶ En mangeant, en achetant n'importe quel objet qui contient du plastique, du fer, de l'aluminium, du tissu, du papier... vous avez consommé de l'énergie (et sur le graphique ci-dessus ne figure pas l'énergie utilisée pour le transport des matériaux pour le compte de l'industrie, pas plus que le chauffage des bureaux, etc). Le fait que certains matériaux soient "recyclables" ne signifie aucunement que :
 - leur recyclage à l'identique est possible. Si le verre bouteille est bien recyclé pour faire d'autres bouteilles, du plastique recyclé ne peut pas nécessairement s'employer partout où s'emploie du plastique "neuf", et la majeure partie des matériaux dits "recyclables" sont en fait inutilisables pour être réemployés pour fabriquer les objets dont ils sont issus. Par exemple de nombreux résidus métalliques d'incinération sont "recyclés" pour faire des revêtements de routes. Mais accroître le réseau routier est un "recyclage" dont le côté "écologique" peut largement se discuter !
 - Ce recyclage soit intéressant du point de vue énergétique. Par exemple, aujourd'hui, fabriquer du papier à partir de bois ou à partir de papier recyclé est à peu près équivalent du point de vue énergétique (dit autrement, partir de papier recyclé ne permet pas d'économiser de l'énergie pour la fabrication du papier "neuf", parce que certains procédés nécessaires quand on part de papier recyclé - par exemple le désencrage - consomment autant d'énergie que les procédés utilisés quand on part de bois). Penser que l'on peut acheter plein de papier sans impact sur l'environnement si l'on fait l'effort de le mettre ensuite à la poubelle à papier est donc hélas un leurre. En fait "recyclable" signifie essentiellement, aujourd'hui, "sert à quelqu'un pour faire quelque chose d'autre", mais jeter des matériaux recyclables est toujours moins intéressant que d'arriver à s'en passer ! (sans les remplacer par d'autres, évidemment).

Dans ce vaste inventaire à la Prévert que nous voyons ci-dessus, quel est l'espace éventuel pour les renouvelables ?

- ▶ Si l'on peut - sur le papier - envisager de recourir aux renouvelables pour l'électricité ou le chauffage des cornues dans l'industrie, il n'est pas possible de substituer les renouvelables aux sources fossiles comme matière première à production constante : on ne peut pas facilement remplacer le pétrole par du bois ou du vent (!) pour faire du plastique. Il est certes possible

de faire toute la chimie organique avec du bois, mais avec des rendements qui ne permettent pas d'envisager le volume de production d'aujourd'hui.

La chimie, qui nous fournit aujourd'hui bon nombre de produits "incorporant" du pétrole ou du gaz (par exemple le plastique, donc, mais encore les engrais ou...les ordinateurs), n'est donc pas "renouvelable" sous sa forme actuelle. Par le biais des hydrocarbures nous avons donné un coup d'accélérateur à notre consommation d'à peu près n'importe quoi, transformant à grande vitesse du pétrole en d'autres produits (tupperware, jeux de construction pour enfants, routes, sièges de voiture et bas nylon, ou.....[en viande par le biais des engrais](#)), que les sources renouvelables ne permettront pas de maintenir au même niveau.

► De toutes les sources renouvelables de chaleur - [solaire thermique](#), biomasse, géothermie - seule la géothermie, la biomasse (les premières forges étaient alimentées au bois) et le [solaire à concentration](#) offrent une ressource suffisamment concentrée pour alimenter une usine en chaleur. L'exploitation de la géothermie pour refroidir lentement l'écorce terrestre (sans grand dommage pour nous) reste, aujourd'hui, une solution sur le papier, mais le potentiel réel, quoi que probablement significatif, n'est pas bien connu.. Quant à la biomasse, l'utiliser intensivement à la place du charbon, du pétrole et du gaz qui font aujourd'hui tourner l'industrie conduirait peut-être à la déforestation rapide de l'Europe : c'est le charbon qui a sauvé nos forêts ; le début de l'industrialisation s'était accompagné d'une exploitation pas renouvelable du tout du bois en Europe !

Enfin pour le solaire à concentration, il faut alors installer les usines dans les endroits insolés quasiment toute l'année : pas impossible, mais sauf à construire d'énormes réseaux THT allant du Maghreb ou du Sahara à l'Europe, il faudrait délocaliser toutes les industries qui consomment de l'électricité dans ces mêmes endroits !

► Les renouvelables ne peuvent non plus pas grand chose pour la sidérurgie, qui consomme à elle seule 15% de l'énergie de l'industrie, car cela représente pour l'essentiel du charbon nécessaire à la réduction du minerai de fer (la réduction est la réaction chimique inverse de l'oxydation : c'est celle qui consiste à "enlever" l'oxygène d'un composé chimique ; ici il s'agira d'enlever l'oxydène des oxydes de fer qui composent le minerai, pour obtenir du fer sous forme de fonte, c'est à dire encore mélangé à quelques impuretés dont du carbone). Il existe certes des solutions sur le papier, à savoir la réduction à base d'hydrogène ou le remplacement du charbon par du bois, mais là encore les quantités disponibles de manière réellement renouvelable ne permettraient probablement pas de maintenir la production d'acier au niveau d'aujourd'hui. Peut-être que le solaire à concentration

permettrait de produire assez d'hydrogène, mais là encore il faudrait déplacer toutes les aciéries sous les tropiques, et cela ne se ferait pas en une semaine !

►L'hydroélectricité peut délivrer de fortes puissances (jusqu'à plusieurs GW). L'hydroélectricité, qui fournit "à la demande", permet d'alimenter une usine sans problème (raison pour laquelle la fonderie d'aluminium, très gourmande en électricité, s'est historiquement installée dans les vallées de montagne ou près des grands lacs du Canada ou des pays nordiques, où il était possible de mettre des barrages). Mais l'industrie française consommant un tiers de l'électricité française, et les barrages produisant actuellement 15% de cette même électricité, il faudrait les doubler pour faire fonctionner l'industrie à l'électricité entièrement renouvelable, avec vraisemblablement des problèmes de saisonnalité, et bien entendu nous n'aurions plus la possibilité de recourir à cette source d'énergie renouvelable pour les autres usages examinés ici.

►L'éolien peut certes délivrer des puissances respectables quand le dispositif fonctionne (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de MW) mais la production est intermittente, ce qui le met "hors course" pour l'industrie (qui réclame une alimentation constante) tant que le [stockage en masse de l'électricité n'est pas possible](#).

Bref sur les 80 Mtep de consommation de l'industrie, seuls 30 (l'électricité) pourraient être fournis par les renouvelables, au prix d'une multiplication par 3 des lacs de barrage en France (ce qui n'est techniquement pas possible aux dires d'EDF), et une fraction minoritaire de la chaleur (50 Mtep) pourrait être fournie par le bois, la géothermie, et du solaire dans le Sud de la France. Le fait de ne plus avoir de pétrole ou de gaz naturel comme matière première pour la chimie conduirait à une baisse des productions dont je ne connais pas l'ampleur, mais une division par n'importe quoi entre 2 et 10 me paraît plus probable qu'une diminution de 5%.

Transports

Ce poste représente aujourd'hui un quart de la consommation d'énergie en France, si l'on y réintègre l'essentiel du poste "secteur énergie" (voir [premier graphique](#) de la page), lequel concerne pour une large part les raffineries, qui produisent majoritairement

du carburant pour automobiles (aux 2/3). "Economiser l'énergie", pour rebondir sur la question du haut de la page, signifie donc aussi moins se déplacer !

Les options pour remplacer le pétrole - énergie prépondérante de la mobilité - sont ici :

- Les biocarburants. Mais un rapide calcul d'ordre de grandeur montre que cette marge de manoeuvre est voisine de zéro pour conserver un niveau de mobilité motorisée proche de l'actuel (voir [détail du calcul](#)).
- L'électricité renouvelable, ce qui nous ramène au problème précédent, avec un bémol d'importance : pour les moyens motorisés "légers" (scooters par exemple, mais pas pour les voitures actuelles, bien trop lourdes), les puissances requises se mettent à être compatibles avec l'énergie délivrée par des [panneaux photovoltaïques](#) individuels, ce qui permet d'envisager un modeste recours à l'énergie solaire décentralisée lorsque les panneaux seront économes en énergie à fabriquer (ce qui est probable d'ici à quelques années). Par ailleurs, si l'existence de dispositifs de stockage (batteries, réservoirs d'air comprimé...) atténue fortement le problème de l'intermittence pour les sources non constantes (solaire et éolien), ces dispositifs induisent une consommation supplémentaire car....il faut les fabriquer (batteries par exemple), ce qui consomme de l'énergie et nécessite un usage de matériaux non renouvelables (métaux rares notamment). En outre le cycle "stockage - déstockage" d'une batterie n'a qu'un rendement de 75% environ, il faut compter avec des pertes en ligne si l'électricité est produite "ailleurs" (l'essentiel des pertes a lieu au moment du passage en basse tension). Le stockage de l'électricité induit donc souvent la nécessité de produire significativement plus que l'énergie nécessaire pour l'usage final.

En outre, si nous remplaçons de la chaleur (dans les moteurs) par de l'électricité produite sans source chaude intermédiaire (hydroélectricité ou éolien), nous devons raisonner à énergie finale équivalente (voir [explications sur cette autre page](#) ; pour ceux que cela rase vous en êtes réduits à me croire sur parole !).

En conclusion, pour substituer "quelque chose" au pétrole nous disposerions essentiellement de l'hydroélectricité, du solaire ou de l'éolien (avec stockage dans les deux derniers cas), mais :

- le seul recours à l'hydroélectricité nécessite de rajouter 20 fois les lacs de barrage existants pour produire 50 Mtep (à énergie finale équivalente), non compris l'énergie nécessaire à la fabrication de 30 millions de voitures électriques, c'est-à-dire n'importe quoi jusqu'à 100 ou 200 Mtep à vue de nez.
- Le seul recours à l'éolien nécessite de [couvrir pour ce seul usage de l'ordre de 10 à 20% du territoire métropolitain d'éoliennes](#), car 50 Mtep d'électricité finale représentent environ 600 TWh électriques, soit 50% de plus que la consommation française actuelle. Bien sûr, les moteurs électriques ont un meilleur rendement que les moteurs à essence, mais même avec un besoin en énergie finale ramené à 20 ou 30 Mtep, cela nous amène encore à des valeurs qui ne sont pas compatibles avec les possibilités de fourniture de l'éolien.

Bref, même en tenant compte du rendement un peu meilleur du moteur électrique, la mobilité que nous connaissons ne peut être satisfaite avec juste des renouvelables. Une division par n'importe quoi entre 4 et 10 paraît plus probable qu'une diminution de 10%. Même le recours massif à l'électricité nucléaire, compte tenu du problème du stockage de l'électricité ou de l'hydrogène, ne permettrait probablement pas la conservation d'un niveau de mobilité proche du nôtre.

A table !

Il y a de la consommation d'énergie dans la nourriture ?!? Mais oui, directement, à travers le carburant des tracteurs, et pour tout ce qui est plat préparé, conserve, surgelé, biscuits, etc, à travers la chaîne du froid, la cuisson, et l'énergie utilisée pour faire tourner les chaînes d'emballage dans les industries agro-alimentaires (voir [premier](#) & deuxième graphiques de cette page). Il y en a aussi indirectement avec la fabrication d'engrais, et le fait qu'à chaque fois que vous achetez un plat ou "une boîte" avec un emballage en carton, en métal ou en plastique vous avez consommé de l'énergie pour disposer du contenant.

Quel espace pour les renouvelables ?

- Les biocarburants pourraient servir à alimenter les tracteurs, au prix d'une mobilisation d'une fraction significative du territoire ([voir détails](#)),

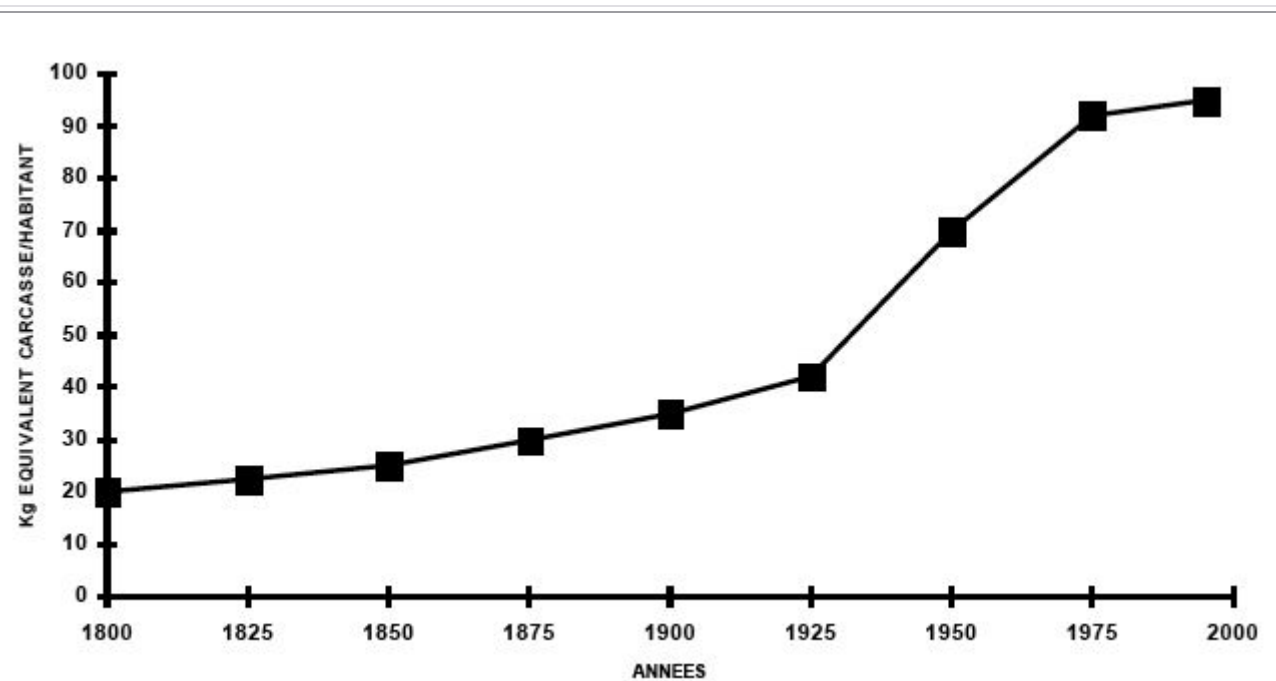
► Pour la part de l'énergie consommée par l'agro-alimentaire, nous avons déjà fait la discussion dans le cadre général de l'industrie (ci-dessus),

► Pour la part indirecte que constituent les intrants de synthèse (engrais, phytosanitaires), les substituts s'appellent...

➤ le fumier pour la fertilisation, ce qui nécessiterait de réaménager toute l'agriculture française pour que chaque hectare de cultures dispose d'animaux qui défèquent d'abondance dans le voisinage immédiat : adieu la spécialisation des cultures sur de vastes zones !

➤ les phytosanitaires "rustiques" (bouillie bordelaise par exemple) mais aussi les prédateurs naturels (dont le nombre croît avec l'aménagement d'habitats à proximité des champs : haies vives, bandes enherbées, etc).

L'agriculture dans un monde qui ne s'approvisionne qu'en renouvelables est bio par la force des choses, mais on y mange nettement moins de viande qu'aujourd'hui.



Consommation de viande en kg de carcasse (viande avec os) par Français et par an de 1800 à 2000. Source : Bernard Sauvart, INRA. L'explosion de la consommation de viande date de l'après-guerre, au moment de la diffusion des engrais et pesticides de synthèse, montrant d'une autre manière que consommation importante de viande et agriculture intensive sont couplées.

En effet, les engrais "chimiques" - fabriqués à partir de gaz naturel ou transportés depuis les mines de potasse algériennes grâce au pétrole - ont permis de faire exploser les rendements, condition *sine qua non* pour pouvoir nourrir beaucoup d'animaux que nous mangerons ensuite. Dans un kilo de boeuf de batterie, il y a 2 à 3 kg équivalent pétrole d'énergie : combien d'adversaires du pétrole et du nucléaire considèrent par ailleurs que tout le monde a le droit de manger du steak en abondance ? Le véritable écolo, c'est [Coffe](#) !

Se chauffer

Le chauffage - des maisons ou des locaux collectifs, que ces derniers soient des usines, des bureaux ou des classes de lycée - consomme environ 50 Mtep par an en France, soit le cinquième de l'énergie primaire hexagonale. C'est dans ce domaine que les possibilités de substitution sont les plus importantes :

- ▶ Le bois pourrait servir de combustible (mais alors les forêts ne sont plus disponibles pour produire du bois d'oeuvre, et mordre ainsi sur la consommation d'énergie allouée à la production de béton ou d'acier pour le bâtiment) ; voir [détails ici](#),
- ▶ L'utilisation directe de l'énergie thermique du soleil est aujourd'hui technologiquement au point, et là aussi la marge de manoeuvre est très importante : si il est probablement impossible de se chauffer uniquement au soleil (la [chaleur se stocke](#) mais pas sur des durées très longues), un gros 50% de l'énergie de chauffage peut en être facilement obtenue ([voir détails](#)). Ajoutons à cela que l'énergie de chauffage pourrait elle-même être divisée par 2 avec un plan massif de rénovation des logements anciens.
- ▶ Enfin il est en théorie toujours possible de se chauffer à l'électricité produite à partir de l'hydraulique ou de l'éolien (qui ne produisent pas directement de chaleur), mais nous avons vu ci-dessus que l'électricité 100% renouvelable est une denrée nettement moins abondante que l'électricité charbonnière, gazière ou nucléaire. Une fois que nous en avons utilisé pour nos déplacements et l'activité manufacturière, il n'est pas évident que nous en aurions encore pour nous chauffer !

A condition de se passer de bois d'oeuvre, et de pas mal de papier, une combinaison solaire thermique/bois devrait donc pouvoir fournir la quasi-totalité de notre énergie de chauffage en France. Cela étant le bois est lourd et ne se transporte qu'au prix d'une consommation d'énergie non ridicule : le chauffage au bois est surtout efficace si le lieu d'utilisation est proche du lieu d'exploitation, ce qui signifie, en clair, que de mettre 80% de la population dans de grandes mégaloilles qui nécessitent du transport longue distance pour l'approvisionnement rend "prisonnier" des sources non renouvelables pour cet usage aussi.

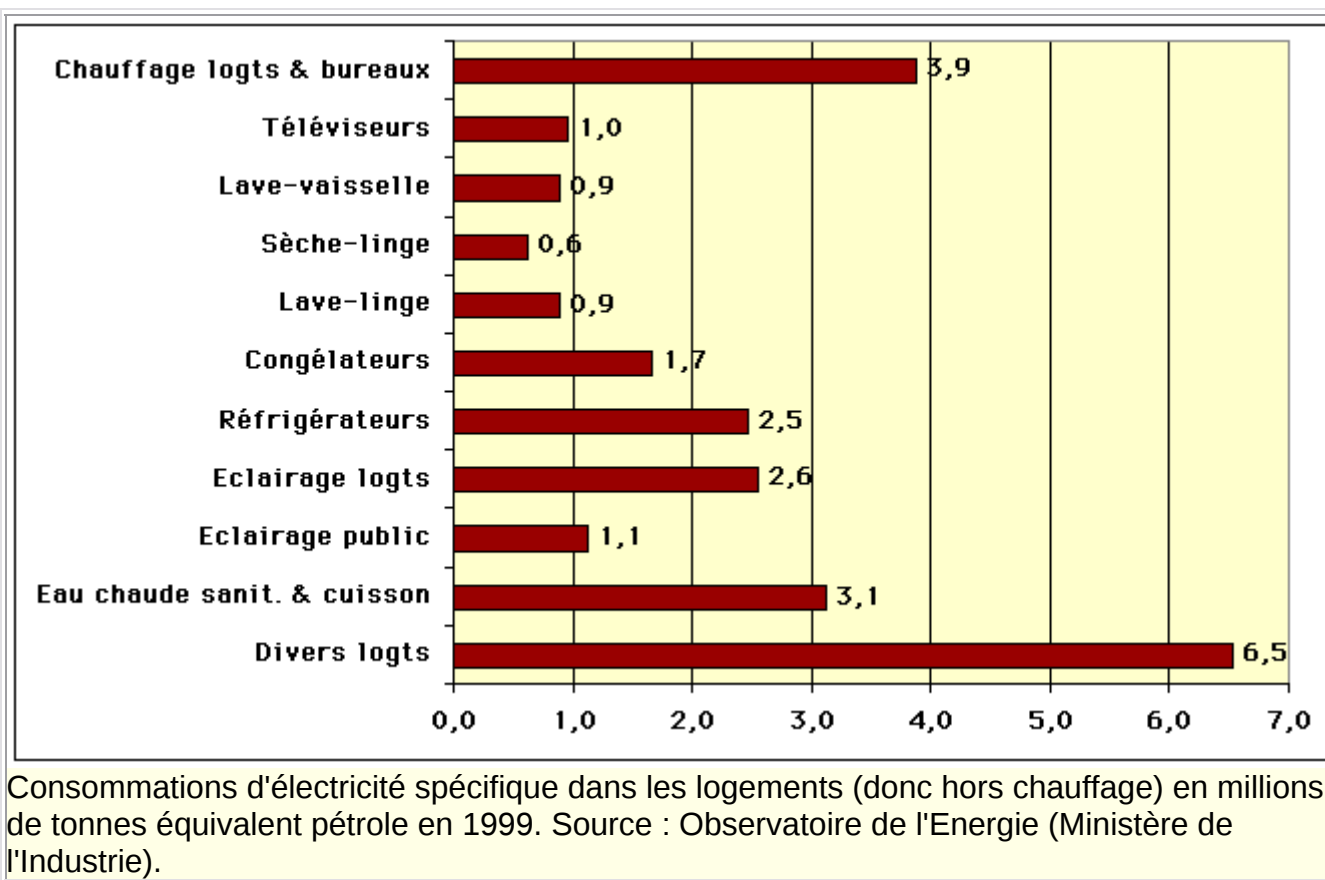
Le chauffage est cependant l'usage pour lequel les marges de manoeuvre sont les plus importantes.

Reste du confort du logement

Ce poste regroupe l'eau chaude sanitaire ainsi que ce que l'on nomme l'électricité spécifique : celle qui sert à autre chose que la production de chaleur, par exemple faire tourner le lave-linge, monter un ascenseur, fonctionner un poste de télévision ou un réfrigérateur.

Le problème de l'eau chaude sanitaire (douches, etc) est exactement le même que celui du chauffage (voir ci-dessus), où il est fréquent que l'on commence par faire de l'eau chaude avant de la faire circuler dans des radiateurs ou des tubes quelconques. Comme l'eau chaude consomme une petite fraction de ce qui est utilisé pour le chauffage, il est probable que les énergies renouvelables ont aussi du potentiel pour cet usage. En fait c'est même là que l'on trouve aujourd'hui la diffusion la plus large, pour les chauffe-eau solaires.

Pour l'électricité spécifique, qui représente environ 30 Mtep par an en France (soit 15% de la consommation d'énergie, en faisant intervenir l'[équivalence à énergie primaire constante](#)) la décomposition se présente comme suit :



Quelques explications et commentaires sur le graphique qui précède :

► L'éclairage des logements, avec 1% de la consommation énergétique française, n'est clairement pas une priorité pour les économies d'énergie devant le transport (moins consommer = moins se déplacer + utiliser des véhicules nettement moins consommateurs), le chauffage (moins consommer = diminuer la taille du logement + baisser la température), ou l'industrie (moins consommer = moins acheter de produits manufacturés ou de services) !

- Même dans un logement, arrêter l'utilisation du sèche linge (qui consomme autant que tout l'éclairage quand il existe) vaut le remplacement par des ampoules basse consommation de toutes les ampoules ordinaires de la maison.
- Se passer de congélateur peut aussi être une source significative d'économies : d'une part la consommation directe est allégée d'autant, et surtout cela évite d'acheter force plats surgelés, alors que les consommations de l'industrie agro-alimentaire pour la fabrication du plat (et de son emballage copieux) et la chaîne du froid (y compris dans les grandes surfaces) sont significatives. Dans une pizza surgelée, il y a bien plus de pétrole que de jambon !

Que peuvent nos renouvelables pour cette affaire ? Comme il faut de toute façon de l'électricité pour faire fonctionner un ascenseur ou un frigo, nous sommes restreints aux modalités qui peuvent en produire : éolien, hydroélectrique, solaire. La consommation correspondante, soit 140 TWh représente ce qu'il est théoriquement possible de produire avec une fraction seulement de la surface de toits en panneaux solaires (voir [détail du calcul](#)), car nous avons ici un usage décentralisé avec généralement de faibles puissances unitaires, ce qui rend cette modalité éligible.

Mais il faut fabriquer le panneau, la batterie, et stocker en l'absence de soleil, et tout cela induit des décotes significatives (voir ci-dessus). En outre, tous les pans de toit ne sont pas orientés au sud, et il est donc vraisemblable que nous serions limités à une fraction de la consommation électrique actuelle avec cette modalité d'approvisionnement. Pour l'[éolien](#) nous retrouvons le problème du stockage, mais l'hydroélectricité permet par contre de surmonter ces inconvénients, au prix, pour cette consommation, d'un ajout de 2 fois les surfaces de barrage actuelles (et d'éventuels problèmes de saisonnalité).

Notons que l'usage des toits pour produire de l'électricité rend actuellement la surface indisponible pour un usage thermique, mais cela ne sera peut-être pas le cas pour l'éternité, car des panneaux solaires en cours de développement visent à permettre de récupérer à la fois la chaleur et l'électricité.

Conclusion

Il est raisonnable de considérer qu'un monde qui ne fait appel qu'aux renouvelables a donc de sérieuses différences avec le nôtre. J'espère avoir convaincu le lecteur que l'abondance matérielle, qui suppose pour commencer la production de masse d'acier, de

béton, etc, n'est pas possible au niveau que nous connaissons - voire pas du tout pour un certain nombre de matériaux très difficiles à obtenir sans pétrole - dans un tel contexte. Par ailleurs les problèmes de stockage des modes intermittents, avec les consommations intermédiaires que cela représente, le fait que les renouvelables posent de redoutables problèmes de concurrence d'usage des sols, et les limitations nées des lois de la physique (personne ne changera l'énergie cinétique d'une masse d'air qui se déplace à une vitesse donnée, donc la quantité d'énergie éolienne récupérable) font que notre monde actuel - où l'énergie abondante est omniprésente - ne peut subsister avec juste des renouvelables, et il s'en faut probablement de beaucoup. Dès lors est-il sage de nous organiser en dépendant chaque jour un peu plus d'une ressource qui ne sera pas commodément remplaçable ?

Ajoutons que la conversion éventuelle à des modalités renouvelables de tout ce qui pourrait l'être conduirait à une utilisation des sols que bien des "écologistes" réprouvèrent probablement : il faudrait couvrir la quasi-totalité de la France de barrages, de forêts cultivées de manière intensive pour le bois de feu (donc avec une biodiversité pas toujours terrible...), d'éoliennes, et de cultures elles intensives pour les [biocarburants](#). Peut-on considérer qu'un tel tableau correspond à un développement "propre" ?

Il est vraisemblable que sauf mise en oeuvre d'un programme raisonnable de réacteurs nucléaires à neutrons rapides (mais il faut compter 40 ans pour le mener à bien : en aucun cas le nucléaire ne pourrait servir de roue de secours pour remplacer tout le reste à bref délai lorsque nous aurons des angoisses de pénurie ou de [dégâts climatiques](#)), l'abondance énergétique prendra fin avec les combustibles fossiles, les renouvelables seules étant totalement incapables de les remplacer au présent niveau, même si elles ont bien entendu leur place dans l'approvisionnement du futur.

Même le recours au nucléaire ne permettra pas de conserver l'organisation actuelle de la société, l'électricité ne pouvant commodément remplacer le pétrole comme matière première. La première mesure si nous souhaitons être prudents, du point de vue énergétique, est bien de prendre le chemin d'une [division de la consommation d'énergie par 2 ou 3](#), et non de l'augmenter "tant que ça passe", en pensant que les renouvelables permettront de prendre le relais quand nous le souhaiterons....

A quoi ressemblerait un monde "énergétiquement vertueux" ?

Première version : avril 2000 - Date de dernière modification : 1er septembre 2003

Il est de fait que la [consommation d'énergie que connaît le monde actuellement](#) - et plus encore celle qu'il s'apprête à connaître si nous [prolongeons les tendances](#) - est excessive si nous entendons que notre monde soit "durable". Cette assertion se base notamment sur un triple constat, désormais bien connu :

- les ressources énergétiques que nous utilisons actuellement sont essentiellement (plus des trois quarts) des [ressources fossiles](#) (charbon, pétrole, gaz). Ce sont des énergies de stock (nous nous en servons par ponction sur un stock), et [le stock, quoi qu'inconnu avec précision, est limité](#). A une échéance indéterminée, **mais de manière certaine**, nous ferons sans.
 - ces ressources fossiles contribuent puissamment à l'accroissement de l'[effet de serre](#) (lecture conseillée avant ce qui suit), dont les effets sont irréversibles à l'échelle d'une vie humaine. La différence entre ce que nous émettons actuellement et [ce qu'il faudrait émettre pour stabiliser les concentrations](#) n'est pas mince !
 - Le mode de vie des sociétés "en développement" et le nôtre étant destiné à converger, par suite de la circulation rapide de l'information (je suis de ceux qui pensent que, en laissant les choses se faire d'elles mêmes, la société de l'information renforce la société de consommation), il n'est pas possible qu'il converge vers un niveau de consommation qui est le nôtre actuellement : appliquer à 9 milliards d'individus mon style de vie ou le vôtre ne permet pas de "tenir dans la boîte" (quelques calculs peuvent se [trouver ici](#))
- Un monde "énergétiquement vertueux" serait donc un monde compatible avec l'idée du développement durable (encore que d'aucuns feront remarquer, non sans raison, que le développement est, par essence, non durable, et qu'il vaudrait mieux parler de "sous-développement acceptable" !). Nous devrions en particulier éviter :
- de créer ou accroître une dépendance peu réversible à court terme envers une énergie de stock (les énergies fossiles en font partie), un tel système débouchant inéluctablement sur la pénurie,

➤ de laisser aux générations futures (à commencer par nos enfants et petits enfants) plus de déchets ([de toute nature, le CO₂ en faisant partie](#)) à gérer qu'ils n'en sont capables sans dommages ou diminution forte de leur qualité de vie par rapport à la nôtre.

En partant de ce postulat, à quoi ressemblerait très concrètement une société énergétiquement vertueuse ?

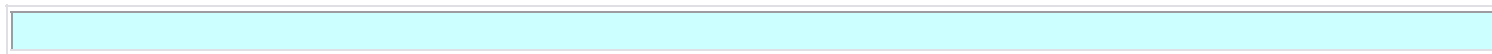
Dans le cadre d'une tentative, nécessairement modeste, de clarification (ou plutôt de débroussaillage à la serpe) du débat, j'ai essayé de lister ci-dessous quelques implications que cela engendrerait pour notre vie au quotidien, pour l'économie et pour l'individu lambda.

Ce qui suit n'est pas destiné à être un "vade-mecum" pour dictateur écologiste mais juste ce qui constituerait quelques conséquences plus ou moins logiques d'un choix de "vertu énergétique". Ce choix n'est bien entendu pas "obligatoire" (sinon ce n'est plus un choix).

A quelles énergies "avons-nous droit" dans une société énergétiquement vertueuse ?

➤ **Nous n'avons probablement pas droit au niveau actuel de consommation énergétique.**

On ne produit pas d'énergie sans produire de déchets ou d'effets indésirables : il n'existe de ce fait aucune source d'énergie qui soit totalement propre. J'ai essayé (ci-dessous) de hiérarchiser les énergies en fonction des déchets qu'elles engendrent. Il ne s'agit pas de qualifier les effets ressentis par la population mais les conséquences factuelles.



Type d'énergie	Nature de déchets	nature de la conséquence	ampleur de la conséquence	irréversibilité de la conséquence (1)	existence d'une solution technique au problème	effet pervers de la solution ?
charbon	CO ₂	changement climatique	très forte	totale	oui pour les centrales	-
	pollution locale (SO ₂ notamment), particules fines	pluies acides, effets sanitaires	forte	moyenne	oui (filtres)	oui : consommation accrue
	Cendres	contamination des nappes par ruissellement	moyenne à forte	moyenne à forte	partielle	peu
pétrole	CO ₂	changement climatique	très forte	totale	non	-
	Pollution locale (oxydes d'azote, ozone, particules, etc)	impacts sanitaires (hausse de la mortalité et de la morbidité)	moyenne	faible	oui (pots catalytiques, filtres, etc)	oui : augmentation de la consommation
gaz naturel	CO ₂ , fuites de méthane	changement climatique	très forte	totale	non	-
nucléaire	déchets radioactifs	occupation d'espace (pour le stockage)	faible (2)	totale	oui : baisse des quantités produites	probablement pas
hydraulique	Emprise au sol, destruction de fonds de vallée, déplacement de population induisant lui-même des atteintes à l'environnement (urbanisation ailleurs, etc).	changement d'occupation de l'espace au sol	faible à forte (faible pour les micro-centrales sur dérivation, forte pour les méga-barrages)	forte	non	-

biomasse	concurrence d'utilisation des sols	occupation d'espace	forte	faible (on peut arracher)	très partielle	?
solaire	déchets engendrés par la fabrication des panneaux	halocarbures , produits toxiques divers	moyenne à forte avec les technologies 2000	moyenne	oui (amélioration des technologies)	probablement pas
	panneaux & chauffe eaux en fin de vie	occupation d'espace (par les décharges requises)	faible	faible	oui (amélioration du recyclage)	?
	effet visuel pouvant être négatif	désagrément visuel	faible	moyenne	oui	probablement pas !
éolien	effet visuel pouvant être négatif	désagrément visuel	moyenne (3)	moyenne	oui : efficacité	probablement pas !
	bruit	désagrément auditif	moyenne	moyenne	oui	probablement pas !
	concurrence d'utilisation des sols	occupation d'espace	moyenne (3)	moyenne	?	?

Pour chaque source d'énergie la couleur utilisée classifie l'ampleur des conséquences (par exemple un dérèglement climatique est une conséquence de très grande ampleur, mais la plantation de la moitié de la France en bois de chauffage le serait aussi !) et le degré d'irréversibilité : pour l'effet de serre par exemple, le phénomène est irréversible à l'échelle d'une vie humaine.

(1) à l'échelle d'une vie humaine

(2) cf. ci-dessous après le tableau

(3) une éolienne prise isolément n'induit bien entendu qu'un désagrément visuel assez faible. Cette assertion est faite dans l'hypothèse où cette forme de production se développe un tant soi peu.

D'aucuns trouveront curieux, probablement, que je ne qualifie pas l'énergie nucléaire comme très dangereuse. Mais une analyse objective des chiffres montre que c'est pour le moment une des formes les plus propres qui soit de production d'électricité concentrée :

➤ le nucléaire français produit 80% de notre électricité et engendre 110 m³ de déchets de haute activité par an (soit un carré de 10 m de côté et de 1 m d'épaisseur, ou encore le volume de 10 voitures). Par comparaison :

▶ l'industrie française produit environ 10 millions de m³ de déchets toxiques par an, soit 10.000 fois plus (chaque Français est indirectement responsable de 3 tonnes de déchets industriels par an, environ),

▶ la même électricité faite au charbon - sans parler des émissions de gaz à effet de serre - engendrerait de l'ordre de 20 à 30 millions de m³ de cendres, soit 20.000 fois plus, cendres qui sont aussi toxiques (elles contiennent des tas de résidus dangereux) et dont le lessivage par la pluie, par exemple, conduit à des pollutions de nappes phréatiques.

➤ le nucléaire civil a tué quelques centaines de personnes (Tchernobyl compris) dans toute son histoire (Les Nations Unies en mentionnent 35 ; [Nations Unies/APELL](#)). En comparaison :

▶ Les mines chinoises de charbon tuent probablement quelques milliers de personnes par an (l'ordre de grandeur m'a été confirmé par des charbonniers, mais le chiffre exact est très difficile à obtenir), et les mines ukrainiennes quelques centaines.

▶ Conduire en voiture tue près de 100.000 personnes par an dans les pays de l'OCDE (soit un peu moins de **300 par jour**) sans compter la pollution, que l'on soupçonne d'en tuer deux fois plus (Rapport au Conseil de l'Europe de M. Tiuri)

▶ 30.000 américains meurent chaque année à cause des armes à feu ;

▶ il mourrait le même nombre de personnes à cause des centrales à charbon dans ce même pays (à cause de la pollution aux particules fines notamment),

▶ enfin plus d'un million de personnes meurent chaque année à cause de l'alcool et du tabac dans les pays développés, sans mentionner l'obésité qui se présente comme un bon challenger....

➤ Les dégâts constatés du nucléaire civil ne sont donc pas significatifs dans l'ensemble des nuisances que nous nous infligeons et la focalisation des media sur cette forme de production d'électricité n'est pas représentative de ses inconvénients réels. Faut-il y voir un amalgame avec le nucléaire militaire, dont les avantages sont par contre nettement plus discutables ?

Sur la base des chiffres les inconvénients du nucléaire sont finalement très peu gênants à leur niveau actuel, et force est de constater qu'il y a un [décalage important entre les risques réels et les risques perçus sur cette technologie](#).

Cela étant, généraliser à l'ensemble de la planète le niveau de consommation énergétique qui est le nôtre conduirait à une multiplication de la consommation d'énergie par 4, ce qui, même avec les sources les moins sales possibles, poserait probablement problème, comme on le verra ci-dessous.

► Dans une société énergétiquement vertueuse, nous n'avons plus droit aux ressources fossiles

➤ Elles sont responsables de 65% de la contribution humaine à l'accroissement de l'[effet de serre](#), phénomène qui aura des conséquences irréversibles à l'échelle d'une vie humaine, et [potentiellement dévastatrices](#),

➤ [Elles sont limitées](#) : dans un monde restant fortement dépendant de cette source d'énergie, l'accès aux ressources ultimes engendrera des foires d'empoigne dont on ne peut écarter qu'elles débouchent sur des conflits armés, y compris entre pays riches, ou des liens de dépendance s'assimilant à une forme d'esclavage (également y compris entre pays riches).

Il faut savoir que la [prolongation tendancielle de la consommation actuelle](#) (mondiale) de combustibles fossiles (en conservant une croissance de quelques % de la consommation chaque année) nous conduit à consommer toutes les réserves connues en 50 ans (et une partie des réserves additionnelles supposées), avec donc des tensions qui apparaîtront bien avant.

Ce raisonnement est valable quelle que soit l'énergie fossile, et s'applique donc aussi au [gaz](#).

► Nous avons droit au solaire

- il est peu probable que l'on perturbe gravement le système climatique avec une production significative d'énergie solaire : la Terre reçoit chaque jour du soleil 20 fois la consommation énergétique annuelle de l'humanité toute entière (le pourcentage de ce que nous utiliserions en étant 100% solaire serait donc de l'ordre de 0,01% de l'énergie reçue). En outre, quasiment toute l'énergie solaire qui parvient au sol est naturellement transformée en chaleur (la seule exception est la photosynthèse : une fraction de % de l'énergie recue par la végétation), et l'utiliser pour chauffer des maisons ne perturberait pas significativement les cycles naturels, pas plus que de convertir l'énergie solaire en électricité - qui finit aussi par devenir de la chaleur (et la perturbation serait bien inférieure à celle engendrée par les émissions de gaz à effet de serre : il y a deux à trois ordres de grandeur de différence entre les deux !),
- La source est renouvelable à l'infini (elle durera plus longtemps que notre civilisation : encore quelques milliards d'années pour le soleil ; je ne parierais pas mes petites économies que l'espèce humaine survivra sur cette durée !).
- A part pour la fabrication et la fin de vie des capteurs (panneaux photovoltaïques ou chauffe-eau solaires), qui peut quand même représenter une pollution non négligeable pour le photovoltaïque, le fonctionnement des dispositifs de conversion n'émet quasiment aucun déchet solide, liquide ou gazeux (et pas de bruit non plus),
- Les surfaces requises pour disposer d'un appoint significatif sont [compatibles avec les surfaces disponibles](#), même en cas de report d'une partie de la consommation d'hydrocarbures sur de l'électricité (véhicules électriques par exemple) qui engendrerait une augmentation de la consommation globale d'électricité "toutes choses égales par ailleurs". Par contre des avancées technologiques - en vue - sont encore nécessaires avant que les rendements nets (c'est à dire l'énergie produite par un panneau sur sa durée de vie moins l'énergie consommée par la fabrication du même panneau) soient bons.
- Cette forme d'énergie permettrait aux pays du tiers monde, qui disposent de zones généralement mieux insolées que chez nous, de disposer d'une puissance par habitant très significative - et donc de se "développer" - en émettant peu de CO₂.

► Nous avons un peu droit à l'hydraulique

- La source est renouvelable à l'infini, puisqu'il s'agit d'un dérivé de l'énergie solaire,
- Le fonctionnement normal n'émet quasiment aucun déchet (solide, liquide ou gazeux), et pas de bruit,
- Une certaine forme de production décentralisée est possible par le biais de micro-centrales (mais le potentiel est limité),
- Par contre cela requiert des infrastructures lourdes (les barrages) dont l'implantation est traumatisante pour l'environnement (inondation de fonds de vallées, déplacement de populations, impact sur les populations piscicoles, etc), et qui peuvent causer des accidents graves (quelques ruptures de barrage ont provoqué plus de 2000 morts),
- le nombre de sites éligibles n'est pas infini.
- Si en outre ces barrages servent à l'irrigation cela peut conduire à des impacts écologiques locaux très forts (cas de la Mer d'Aral qui a vu sa taille divisée par 2 à la suite des prélèvements pour l'irrigation) mais cela est une conséquence de la gestion des ressources en eau, non de la seule politique énergétique.

► Nous avons droit à la biomasse, mais pas dans n'importe quelles conditions

➤ La source est renouvelable à l'infini, puisqu'il s'agit aussi d'une certaine manière d'un dérivé de l'énergie solaire, mais à **condition de replanter**. Si elle représente actuellement entre 10 et 15% de l'approvisionnement énergétique mondial, la biomasse n'est pas, aujourd'hui, dans la majeure partie des cas, une énergie renouvelable : elle correspond à l'usage comme bois de feu des arbres issus de parcelles défrichée pour l'agriculture. Si il n'est pas replanté, le bois conduit aussi à des émissions massives de CO₂ ! (tableau ci-dessous).

émissions de CO ₂ en g/ kWh (analyse du cycle de vie)	
charbon	800 à 1050 suivant technologie

cycle combiné à gaz	430
nucléaire	6
hydraulique	4
biomasse bois	1500 sans replantation
photovoltaïque	60 à 150 (*)
éolien	3 à 22 (**)

Source : EDF, in [La Jaune et La Rouge de Mai 2000, Jean-Pierre BOURDIER](#)

(*) le CO₂ provient surtout de la fabrication des cellules des panneaux. Suivant que ces panneaux sont fabriqués au Danemark (électricité à 95% charbon) ou en Suisse (électricité majoritairement nucléaire et hydraulique), le contenu en CO₂ est très différent. L'amortissement se fait en 20 à 30 ans suivant les variantes.

(**) suivant lieu de fabrication, idem ci-dessus.

- Certaines filières, notamment l'obtention de carburants liquides, nécessitent d'importantes surfaces agricoles, ce [qui ne permet pas d'espérer un approvisionnement significatif au regard de notre consommation actuelle d'hydrocarbures](#), et en outre le bilan et de certains biocarburants est négatif sur les émissions de gaz à effet de serre (soit ils demandent des consommations intermédiaires d'énergie qui sont supérieures à l'énergie restituée par le biocarburant, soit les biocarburants conduisent à des émissions de [méthane et de protoxyde d'azote](#) très supérieures à ce qu'elles sont avec les carburants fossile).
- l'utilisation comme bois de chauffe offre des possibilités certaines, même dans un pays comme le nôtre, mais il faut alors [moins manger de viande ou se passer de bois d'oeuvre](#).
- Enfin selon les usages le bilan peut être mauvais pour l'effet de serre : par exemple pour certains carburants d'origine agricole une réduction des émissions de CO₂ par rapport aux fossiles peut être concomitante de l'augmentation d'autres gaz à effet de

serre (protoxyde d'azote, méthane) dont les pouvoirs radiatifs sont nettement plus importants que ceux du CO₂ ; le bilan global est alors plus mauvais que celui des carburants fossiles.

► **Nous avons droit au nucléaire, au moins dans les sociétés possédant une bonne culture de la discipline collective**

- Les réserves d'uranium sont limitées, mais avec la surrégénération (soit avec du plutonium, ou mieux avec du thorium), même en supposant que le nucléaire passe de 5% (pourcentage actuel de l'énergie consommée dans le monde d'origine nucléaire) à 100%, nous disposerions de plusieurs milliers d'années de consommation devant nous (l'horizon de visibilité des hydrocarbures est de quelques dizaines d'années, toute considération sur les émissions de CO₂ mise à part).
- Les déchets produits sont solides et liquides, et très concentrés, donc confinables, ce qui n'est pas le cas des gaz à effet de serre,
- La quantité de déchets produites par kW, qui n'est déjà pas considérable, peut être diminuée,
- Les occupations d'espace requises ne sont pas colossales, même pour une utilisation durant quelques siècles,
- Le problème de la sécurité est objectivement un faux problème en temps de paix (cf. ci-dessus), au moins dans les pays riches (qui consomment 80% de l'énergie),
- La prolifération (utiliser les technologies nucléaires à des fins militaires) est pour le coup un vrai problème, mais qui a peu à voir avec le nucléaire civil : 80% de l'énergie étant consommée dans les pays riches, qui ont déjà la bombe ou la capacité à l'avoir, le fait que ces pays augmentent leur parc de centrales (USA, Japon et Allemagne en tête) n'a (hélas !) plus aucune incidence sur la prolifération nucléaire. En outre un certain nombre de pays "pauvres", dont les 2 premiers en termes de population (la Chine et l'Inde) ont déjà la bombe, donc la prolifération pour ce qui les concerne est un problème tranché (on peut le déplorer, et du reste je déplore qu'une arme aussi terrible soit devenue aussi répandue, mais c'est ainsi, et l'on ne refera pas l'histoire ; renoncer au nucléaire civil avec l'espoir que du coup tout le monde renoncera aussi au nucléaire militaire me paraît être une illusion).

➤ Par contre le nucléaire civil pose quand même quelques problèmes :

- ▶ avec les technologies actuelles (utilisant des noyaux fissiles) l'horizon de ressources n'est que de quelques centaines d'années pour une contribution de 5 à 10% au bilan énergétique mondial (en supposant que la consommation mondiale n'augmente pas),
- ▶ il requiert une société stable et disposant d'un minimum de moyens (Tchernobyl est plus un accident soviétique qu'un accident purement technologique), car il requiert une surveillance constante des centrales et des déchets, ce qui est un inconvénient dans les pays qui n'ont pas de culture forte de la sécurité (mais ces pays peuvent, si le monde occidental - où cette discipline existe - se nucléarise fortement à court terme, utiliser le gaz),
- ▶ on peut se demander si, en cas de conflit armé, il ne serait pas tentant pour un ennemi de bombarder les centrales pour désorganiser le pays et le priver des approvisionnements en électricité (comme ce que les Américains ont fait en Serbie, de manière plus "soft", mais tous nos ennemis futurs ne seront peut-être pas aussi prévenants), avec des effets induits potentiellement très graves (une parade pouvant être d'enterrer les centrales).
- ▶ enfin une centrale nucléaire a besoin d'eau pour fonctionner (pour le refroidissement). Si le changement climatique en cours venait à assécher de manière fréquente les cours d'eau utilisés par les centrales, cela les empêcherait de fonctionner. NB : ceci a été écrit en 2001, pas en septembre 2003 !

▶ **Nous avons un peu droit à l'éolien, mais il ne faut pas en attendre de miracles**

- A part pour la fabrication des éoliennes le fonctionnement n'émet quasiment aucun déchet dont la dissémination pose problème,
- L'emprise au sol est en fait assez faible : le rotor se situe en altitude et n'empêche pas d'utiliser l'espace au sol pour autre chose (cultures notamment, mais aussi voies de communication...),

➤A titre d'exemple le potentiel récupérable est estimé, en France, à 50 TWh par an (1 TWh = 1 milliards de kWh ; la France en consomme 450 environ), soit 10% de notre production électrique actuelle (ou 2% de notre consommation actuelle d'énergie finale), mais au prix d'une [consommation d'espace importante](#) si l'on souhaite passer à un stade industriel,

➤Enfin l'éolien ne peut s'envisager de manière autonome, car il faut prévoir un dispositif de remplacement pour les jours sans vent. De fait ce dispositif ne peut être que de l'hydroélectricité, ou des centrales thermiques à flamme (voir pourquoi sur le bas de [ma page détaillée sur l'éolien](#)).

L'énergie éolienne est probablement moins intéressante que le solaire pour les raisons suivantes :

➤elle partage avec le [solaire](#) le caractère intermittent de la production d'électricité, qu'il faut donc [stocker](#) si la contribution devient significative, mais ne permet pas, comme le solaire, une production directe de chaleur, dont le rendement est plus élevé que la production d'électricité,

➤elle cause plus de dommages au paysage,

➤elle requiert encore des infrastructures de transport (lignes moyennes tension), ce qui est un point de vulnérabilité du système par rapport au solaire qui n'en nécessite pas, du moins pas pour la production individuelle.

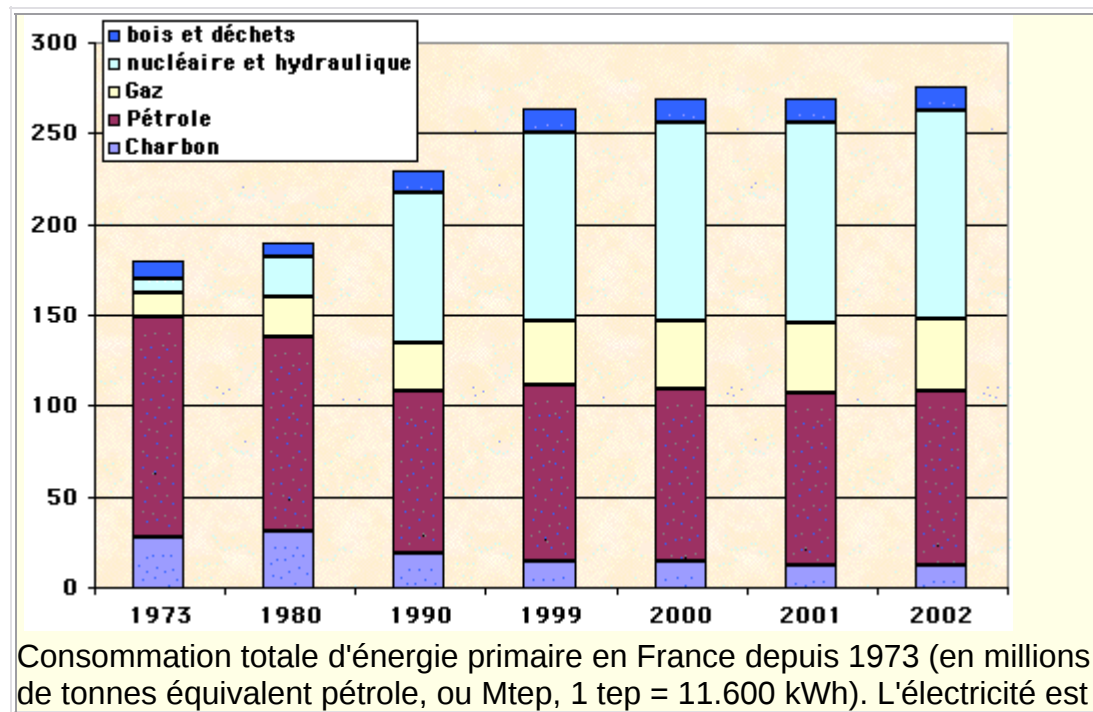
Enfin notons que le prix au kW retenu actuellement n'internalise :

➤ni les dommages au paysage (ni....le temps et l'énergie dépensés pour se battre contre les opposants pour ces raisons d'atteinte !)

➤ni les dispositifs de stockage ou les moyens de production complémentaire (alors que pour le solaire on prend en compte les coûts de stockage pour l'électrification des sites isolés).

Peut-on donner une idée de la proportion des diverses sources d'énergie dans un monde vertueux ?

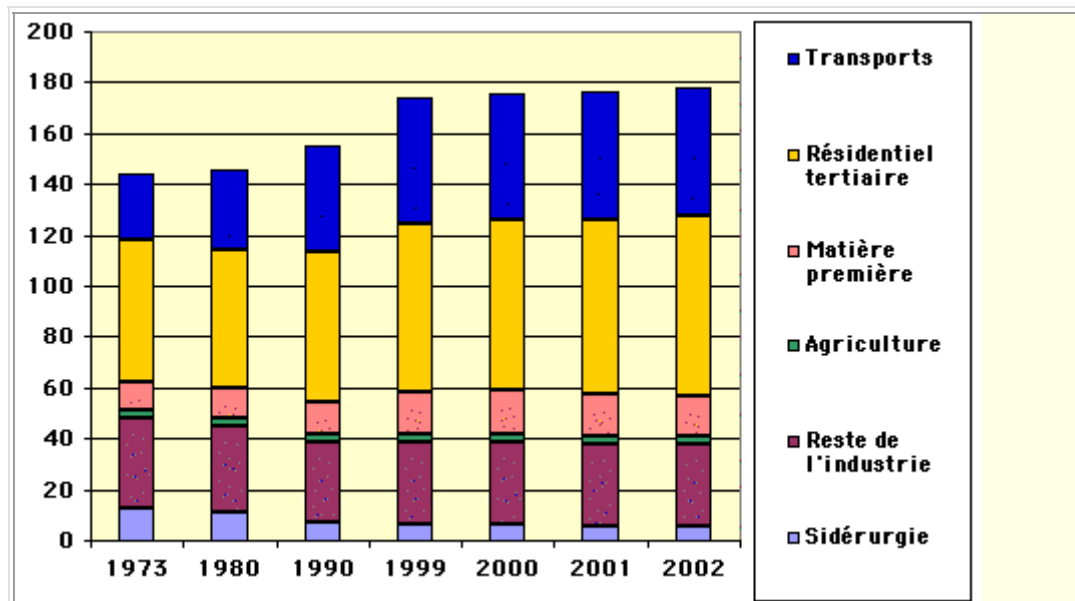
La consommation d'énergie primaire de la France s'est élevée à 275 Mtep en 2002, dont 40% sous forme d'électricité (graphique ci-dessous).



convertie sur la base de l'énergie primaire (celle qu'il faut mettre dans la centrale) et non sur la base de l'énergie finale (celle qui sort de la centrale sous forme d'électricité).

Source : observatoire de l'énergie, [Ministère de l'Industrie](#)

Si nous ne prenons en compte que l'énergie finale, c'est à dire celle que nous utilisons "au final" (la différence vient des pertes dans le système de production et de distribution d'énergie : chaleur perdue dans les centrales électriques, énergie utilisée pour le raffinage, etc), alors c'est "seulement" 178 Mtep qu'il nous faut trouver.



Consommation totale d'énergie finale en France depuis 1973 (en Mtep).

"Matière première" désigne les ressources fossiles qui sont utilisées pour la chimie (par exemple le plastique est fait avec du pétrole, les engrais agricoles avec du gaz naturel, etc).

Source : observatoire de l'énergie, [Ministère de l'Industrie](#)

► **Sans beaucoup toucher à notre mode de vie, nous pouvons assez facilement diviser notre consommation par deux**

En effet les "meilleures technologies disponibles" de 1995 permettraient déjà, si elles étaient appliquées à chaque usage, de diviser notre consommation par deux (cf. tableau ci-dessous).

France	kep/habitant (*) moyenne 1995	kep/habitant meilleure techno disponible	Commentaires	kg C/habitant meilleure techno disponible (+)
Habitat	845	360	-	170
dont confort thermique	740	300	ens. du parc aux normes bât. neufs	170
dont électroménager	35	25	meilleurs équipements 1995	-
dont produits bruns	70	35	optimisat° des systèmes de veille	-
Tertiaire	505	250	-	100
dont confort thermique	415	200	mêmes normes que l'habitat	100
dont usages spécifiques	90	50	optimisation veilles	-
Alimentation	360	250	50% de gains sur froid et cuisson	130
Industrie	775	580	-	270
dont production intermédiaire	625	450	eco-prodécés & recyclage	190

dont biens d'équipt & conso	150	130	-	80
Transports	805	450	-	400
dont personnes	490	250	voitures 4 l/100 & 13.000 km/an	230
dont marchandises	315	200	réduct° puissance camions, TR...	180
TOTAL	3290	1890	-	1070 (**)

Une France équipée systématiquement des meilleures technologies de 1995 (y compris pour les parcs de logement). Source : Les défis du long terme , Commission énergie 2010-2020, Commissariat général du Plan

(*) kep signifie kilo [équivalent carbone](#) ; 1 kep = 11,6 kWh.

(+) il s'agit du nombre de kg équivalent carbone émis pour chaque usage en moyenne pour un Français utilisant les meilleures techniques disponibles.

(**) en 1995 les émissions de CO₂ sont de 1900 kg équivalent carbone par habitant

Si nous arrivions à [diviser notre consommation par deux](#), ce qui nous amènerait à moins de 100 Mtep d'énergie finale, nous pourrions imaginer la répartition suivante pour la fourniture de cette énergie, qui serait compatible avec les postulats de départ :

- que le [solaire](#) couvre 20 à 30% de notre consommation énergétique, en mode décentralisé pour l'essentiel (un dispositif de chauffage solaire basse température par bâtiment + à moyen-long terme un toit photovoltaïque sur chaque bâtiment ou à peu près),
- la [biomasse](#) 10 à 20%, surtout pour le chauffage (pour la part non couverte par le solaire),
- l'hydraulique (qui fait déjà 15% de l'électricité en France) peut rester à son niveau, e qui représenterait 6 à 7% d'un total inférieur à 100 Mtep,

➤ l'éolien pourrait faire quelques % de l'électricité, mais son intermittence [pose problème pour aller au-delà sans mettre des centrales à gaz partout](#),

➤ le solde (soit entre le tiers et une petite moitié) pourrait être produit par du nucléaire, en attendant éventuellement qu'à long terme un solaire rendu plus efficace (et surtout un [stockage plus efficace](#) !) en prenne le relais (mais n'attendons pas les progrès du solaire : [mieux vaut le nucléaire que le pétrole](#) !).

A **long terme**, nous ne dépendrions plus que du solaire et de ses dérivés et du nucléaire civil (ou, idéalement, de la fusion), avec les avantages suivants :

➤ ressources inépuisables ou quasi-inépuisables à l'échelle de l'espérance de vie de notre espèce,

➤ compatibilité avec les besoins en énergie de la population,

➤ moindre compétition pour les approvisionnements (le thorium est très abondant, et l'hydrogène - pour la fusion - encore plus) et donc moindres risques de conflit,

➤ pas d'[effet de serre](#) additionnel,

➤ robustesse (moins de lignes de transport car la partie décentralisée ne se transporte pas), etc.

Notons aussi qu'un monde "énergétiquement vertueux" est un monde où l'énergie primaire disponible est essentiellement électrique, sauf pour la partie chauffage.

► **Et la pile à combustible ?**

La [pile à combustible](#) est en fait un moyen de transformer un carburant en électricité. Elle n'est donc ni plus ni moins "propre" que le carburant utilisé (et la manière de le produire). En particulier, si l'hydrogène qui alimente la pile provient d'un hydrocarbure, ce qui est généralement le cas (l'hydrogène est un produit de l'industrie chimique obtenu par craquage du méthane) l'ensemble de la chaîne émet du CO₂, à peu près autant que si on brûlait l'hydrocarbure directement dans un moteur classique. Le rendement de filière est un peu meilleur que dans un moteur à explosion et on supprime les polluants locaux (particules, hydrocarbures aromatiques, oxydes d'azote, etc).

C'est donc une innovation technique intéressante, mais très loin d'être une "solution miracle" sous sa forme actuelle, car elle ne résoud pas pour le moment le problème de l'approvisionnement en combustible fossile ni en émissions de CO₂.

La seule manière d'en faire une solution réellement propre (sur le plan climatique) est de l'alimenter avec de l'hydrogène produit

- soit par électrolyse de l'eau, électrolyse réalisée avec du nucléaire, ou à la rigueur des éoliennes ou du solaire,
- soit par thermolyse de l'eau dans des centrales nucléaires haute température. (la thermolyse est la dissociation des atomes d'une molécule sous l'effet de la chaleur ; si on dissocie H₂O on obtient de l'hydrogène et de l'oxygène, comme avec l'électrolyse).

On pourrait aussi imaginer craquer de l'eau dans le Sahara avec du solaire à concentration pour y faire de l'hydrogène acheminé ensuite comme du gaz naturel (mais le rendement du transport serait très mauvais, parce que l'hydrogène a une faible densité d'énergie par unité de volume), ou installer des batteries d'éoliennes sur le Groenland dans le même esprit (mais il faudrait en mettre une certaine quantité !).

Dans le cas du solaire, une pile pourrait servir comme dispositif de stockage personnel, par exemple couplée à un panneau solaire (du reste les spécialistes du solaire n'envisagent pas de développement significatif de cette forme de production sans développement d'un dispositif de stockage performant) : l'électricité produite en dehors des périodes de consommation peut servir à produire - avec une pile à combustible réversible - de l'hydrogène qui est stocké puis utilisé comme carburant par la même pile pour les consommations en périodes non ensoleillées.

Un développement plus long sur la pile à combustible peut [se trouver sur ce site web](#).

Ce que nous n'aurions plus dans un tel monde

► L'énergie fossile peu chère ou d'utilisation libre

Appelée à ne plus être utilisée, ou seulement dans quelques cas marginaux, l'énergie fossile devrait coûter très cher et/ou être d'un usage réglementé. Il est donc vraisemblable que des taxes massives et/ou des réglementations spécifiques pèseraient sur cette forme d'énergie.

► Le transport aérien démocratique

Le carburant consommé par personne, lors d'un vol, est équivalent à ce que cette même personne consommerait en parcourant la même distance seule dans une voiture de petite cylindrée (ou de moyenne cylindrée pour les déplacements court-courrier, le décollage étant proportionnellement plus gourmand en carburant).

Ainsi sur un vol aller retour Paris-New York, soit 12.000 km, chaque passager (si l'avion est plein) "consomme" entre 700 et 1.000 litres de carburant, ce qui équivaut presque à la consommation annuelle d'un détenteur de Clio.

Cette forme de transport augmente actuellement de 5% par an (enfin cela dépend des années, mais c'est la forme de transport qui croît le plus vite). Les émissions de CO₂ engendrées par le seul trafic international équivalaient en 1992 à celles de la Grande-Bretagne, et en prolongation tendancielle elles pourraient représenter, en 2050, jusqu'à une fois et demie ce qu'émettent actuellement les USA (ce qui ferait l'équivalent de 40% des émissions de CO₂ du monde entier en 1990).

Ce problème est tellement important que le [GIEC](#) a publié un [rapport](#) en 1999 portant uniquement sur le problème du transport aérien.

Par ailleurs il n'existe pas d'alternative à l'utilisation de carburants chimiques pour l'avion (l'électricité ne fonctionne pas très bien !). On pourrait peut-être garder quelques avions hors de prix fonctionnant à l'hydrogène, ou avec des carburants de synthèse obtenus avec de l'hydrogène et/ou de la biomasse, mais la fraction de l'humanité qui pourrait en profiter diminuerait sérieusement.

La "vertu énergétique" est donc incompatible avec le développement actuel du transport aérien, dont une très forte diminution (plus proche de 90% de baisse que de 5% !) - avec utilisation de carburants issus de la biomasse pour le reliquat - en serait probablement une composante indispensable.

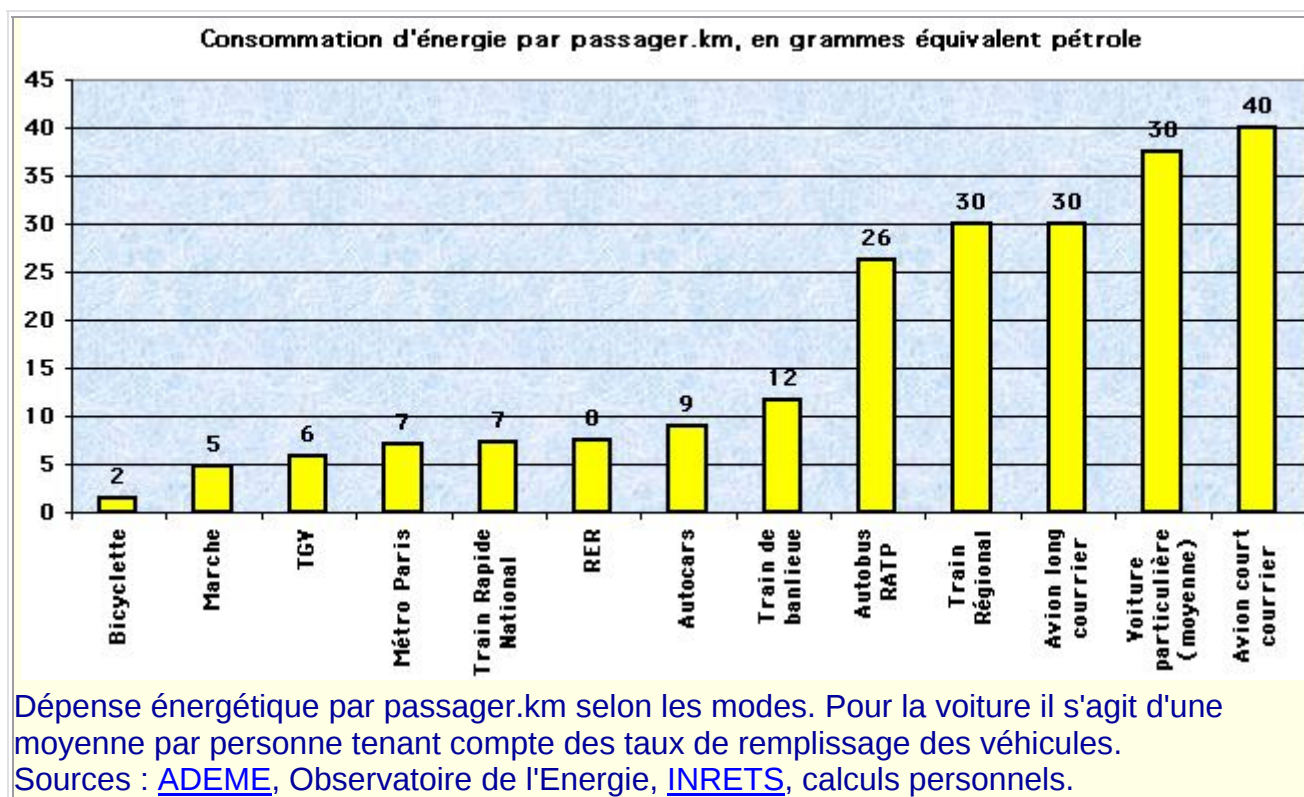
► **D'une manière générale la faculté de se déplacer vite, à volonté et pour pas cher**

Se déplacer vite consomme beaucoup d'énergie (cela découle des lois de la physique !). De fait l'avion est plus gourmand que la voiture, qui est plus gourmande que le train (et va en moyenne plus vite de porte à porte), qui est plus gourmand que le bateau, qui est plus gourmand que le vélo...

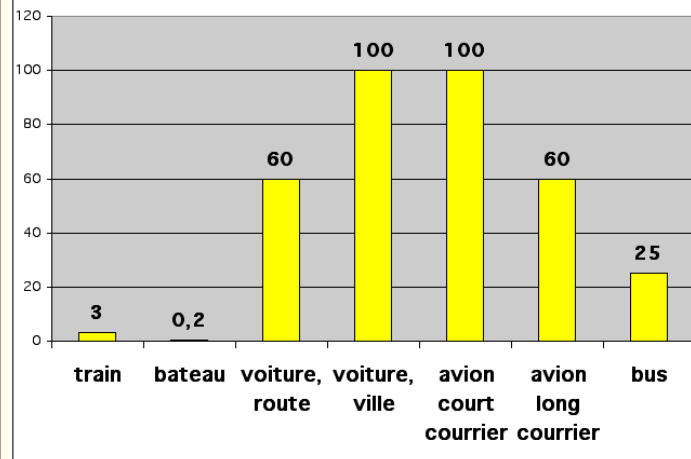
Par ailleurs se déplacer à volonté requiert des moyens de transport surdimensionnés par rapport aux besoins courants : pour être sûr de ne pas avoir de problème le jour du départ en vacances, avec ses 3 enfants, la grand'mère et la canari, on achète une voiture à 5 places utilisée en moyenne par....1,5 personne, ce qui est d'un rendement énergétique déplorable

Dans le cas de la ville (où réside 80% de la population en France, par exemple) le rendement énergétique de la voiture est de toute façon très mauvais face aux alternatives : on va aussi vite en vélo - qui pèse 15 kg tout au plus - qu'en voiture - qui pèse une tonne - sur les distances inférieures à 5 km, et cela pour promener les mêmes 70 kg de bonhomme.

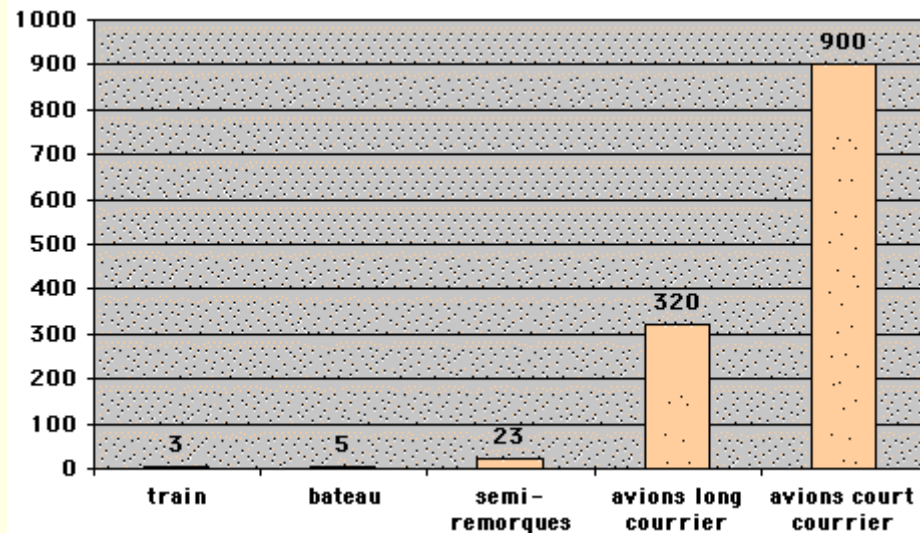
En tenant compte de l'alimentation supplémentaire du cycliste (qui reste quand même plus mince que l'automobiliste, voir ci-dessous) le passage de la voiture au vélo permet une division par 40 de l'énergie nécessaire au déplacement (à distance égale).



L'écart entre modes est encore plus important si l'on regarde les émissions de gaz à effet de serre



Passagers : émissions de gaz à effet de serre par mode motorisé, en grammes d'équivalent carbone par passager.km
 Sources : [ADEME](#), INRETS, calculs personnels.



Fret : émissions de gaz à effet de serre par mode motorisé, en grammes d'équivalent carbone par tonne.km
 Sources : [ADEME](#), INRETS, calculs personnels.

En supposant que l'on ne conserve que les moyens de transport les plus efficace énergétiquement, dans un tel monde "énergétiquement vertueux" subsisteraient :

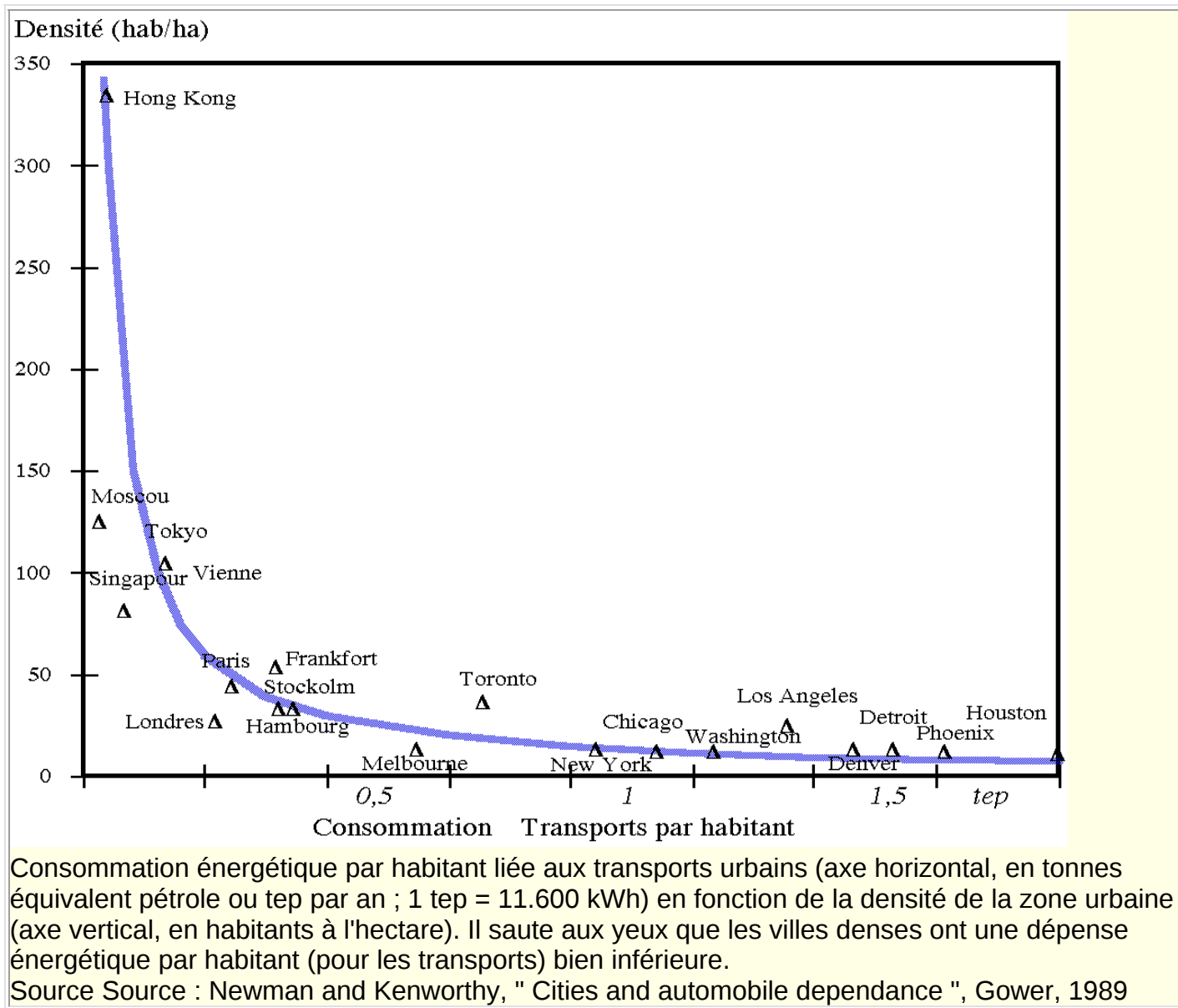
- le train et le bateau pour les déplacements lointains (qui prendraient plus de temps, exactement comme il y a quelques siècles, quand l'énergie était rare),
- essentiellement le métro, le bus, quelques voitures partagées (taxis inclus) et quelques camions en zones urbaines denses,
- le bus, des voitures collectives partagées et quelques camions en zones urbaines moyennement denses,

➤des véhicules légers - ou des taxis - en zones rurales,

➤des moyens non motorisés (vélos, marche à pied, rollers, éventuellement "patinettes électriques") pour les déplacements de proximité (disons inférieurs à quelques km), quelle que soit la zone.

Cette nécessité de faire avec moins de transport que maintenant engendrerait logiquement l'adaptation de l'urbanisme et de la société à une vie peu riche en transports :

➤Il est vraisemblable que les villes seraient globalement plus denses que maintenant (ou en tous cas pas plus étalées), la zone urbaine la plus vertueuse sur le plan énergétique étant la zone dense (cf. ci-dessous),



➤ les zones peu denses des villes ne pourraient subsister que si on y trouvait tout sur place (ce qui était du reste le cas lorsque l'énergie était rare !), c'est à dire à distance cyclable ou marchable (les transports collectifs lourds ne sont déjà pas rentables en zone peu denses, ce serait vrai a fortiori si l'énergie coûtait plus cher) ou...via les réseaux (télétravail notamment). Cela équivaldrait à recréer des villages assez fortement autarciques en termes de fréquentations physiques.

➤ enfin les produits renouvelables de première nécessité se trouvant à la campagne (de quoi manger, du bois pour se loger, et un peu d'espace pour faire son électricité) il n'est pas interdit de penser qu'une société énergétiquement vertueuse serait une société sans grosses villes : concentrer les populations dans des grandes villes implique nécessairement du transport longue distance pour y amener tout ce que les gens consomment et qui, par la force des choses, ne peut être produit sur place (ainsi que de l'énergie pour disperser ensuite tous les déchets produits). Du reste avant l'énergie abondante la population était essentiellement répartie dans des petites implantations unitaires (qui pouvaient elles-même être très denses : dans les vieux villages, les maisons sont souvent collées les unes aux autres), ce qui est un début de preuve du fait que c'est cette forme d'occupation de l'espace qui est la plus efficace énergétiquement pour la société dans son ensemble.

► Des hypermarchés loin de toute habitation

Diverses études montrent que les hypermarchés de périphérie sont nettement plus consommateurs d'énergie par unité de CA vendue que les commerces de centre ville, ce qui est la conséquence de leur éloignement des lieux d'habitation et de l'obligation d'y aller en voiture. La "vertu" énergétique n'est donc pas compatible avec cette forme de commerce, qui disparaîtrait dans notre monde virtuel.

► Des produits manufacturés - et certains services - peu chers

Si l'on y réintègre les transports et consommations tertiaires afférentes (chauffage des bâtiments, etc), l'industrie et ses services annexes consomment, dans les pays industrialisés, une grosse moitié de l'énergie utilisée (cf. ci-dessous).

Répartition 1995	Mtep
Tertiaire	30
dont confort thermique	25
dont usages spécifiques	5
Industrie	47
dont production intermédiaire (1)	38
dont biens d'équipt & conso	9
Transports	34
dont personnes, déplacements prof. (2)	10
dont marchandises	19
TOTAL (sur 198 Mtep)	106

Consommations d'énergie en France pour les usages productifs, 1995

Source : Commissariat Général du Plan

(1) production de matériaux de base : acier, verre, papier, etc.

(2) estimation personnelle : les déplacements professionnels de personnes consomment environ 30% du total de ce poste.

NB : la consommation d'énergie en 1999 était de un peu moins de 215 Mtep.

La production de matériaux de base (acier, verre, plastique, ciment, papier), en particulier, absorbe les 4/5^è de la consommation de l'industrie, la transformation de ces matériaux étant nettement moins gourmande. En outre quasiment tous les procédés de production de matériaux de base sont difficiles à effectuer sans production de chaleur haute température, donc sans combustion. Une forte réduction de la consommation énergétique suppose donc une bien moindre utilisation par personne de ces matériaux de base.

Il s'ensuit que les produits manufacturés en général et tout particulièrement les produits jetables verraient leur coût relatif augmenter, et que la consommation en poids de produits par habitant décroîtrait. La location se développerait au détriment de la possession.

► Des emballages jetables

En conséquence de ce qui précède, la sobriété énergétique est incompatible avec la [prolifération des emballages jetables](#), qui contribue à gaspiller les matériaux de base. Un tel monde verrait donc, par exemple :

- le retour du pulvérisateur et la disparition des bombes aérosol jetables,
- le retour des sacs et cabas et la disparition des sacs en plastique jetables,
- le retour des bouteilles réutilisables et la disparition des bouteilles en plastique, canettes en alu, etc,
- la suppression des emballages inutiles pour aliments, omniprésents actuellement en grandes surfaces (viande en barquettes, pommes de terres en sachet plastique lui-même dans un carton, etc),
- une consommation de papier fortement diminuée...

► La construction de maisons individuelles peu chères

Les techniques actuellement utilisées pour construire une maison requièrent de la combustion fossile peu chère :

- les producteurs de matériaux de base : ciment, acier, plastique, verre, sont de très gros consommateurs d'énergie et de très gros émetteurs de gaz à effet de serre,

➤ transporter ces matériaux, qui sont généralement lourds, sur de longues distances requiert des transports peu chers et donc de l'énergie peu chère.

Dans un contexte où la combustion fossile aurait quasiment disparu et [la combustion de biomasse ne permettrait pas de s'y substituer totalement](#) il faudrait probablement revenir à des matériaux traditionnels (pierre de taille, bois) dont le coût à la construction est supérieur.

► Des lieux d'habitation très chauffés en hiver et très climatisés en été

Tout cela consomme de l'énergie ! Baisser (en hiver) d'un degré la température intérieure d'un local peut faire économiser 7% de la consommation...

► Beaucoup de viande

La production de viande n'est pas une bonne affaire sur le plan des gaz à effet de serre (ni sur le plan de l'eau) :

➤ la production d'une tonne de viande de boeuf (avec os) engendre l'émission de 3 à 4 tonne équivalent carbone, soit autant que pour 6 à 8 tonnes d'acier ! Il n'est pas exagéré de dire qu'aujourd'hui nous mangeons du pétrole, car il faut une agriculture intensive pour produire toutes les plantes qui nourriront le bétail, et cette agriculture intensive requiert de la mécanisation et des engrais de synthèse, toutes choses qui n'existeraient pas en pareille quantité sans pétrole. Rappelons qu'en France, en 1998, les [émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture dépassent celles des transports](#).

➤ il ne faut que 500 l d'eau pour produire 1 kg de pommes de terre, mais il en faut 20.000 à 100.000 pour produire 1 kg de boeuf à partir de fourrages irrigués (il faut environ 50 kg de fourrages/céréales pour faire un kg de viande de boeuf avec os).

Il sera peut-être intéressant de rappeler que la consommation de viande en France a cru exactement comme la consommation d'énergie : elle est passé de 20 kg/habitant/an en 1800 à 100 aujourd'hui.

► **En particulier, des McDo !**

Outre le fait que les McDo sont de gros "consommateurs" de viande de boeuf (mais les hippopotamus sont pires !), un certain nombre d'autres caractéristiques de ces "restaurants" sont antinomiques de la vertu énergétique :

- 80% des 800 nouvelles implantations prévues de McDo sont des McDrive (source Les Echos d'avril 2000), situées en périphérie et incitant les gens à y aller en voiture,
- pour un hamburger acheté chez McDo, on jette généralement un emballage en polymère, dont la fabrication est coûteuse en énergie, plus un sac en papier, dont la fabrication est aussi coûteuse en énergie,
- tous leurs produits arrivent congelés, or la chaîne du froid est une source de gaz à effet de serre (à travers les émissions d'[halocarbuers](#) et la consommation d'énergie).

Les anti-McDo pourront donc à bon droit y voir une chose à leur reprocher : ils sont très loin d'inciter à la modération des émissions de gaz à effet de serre !

Ce que nous gagnerions probablement

► **Plus d'emplois**

Le système économique actuel comporte de nombreux prélèvements sur les salaires (pour les retraites, la sécurité sociale, etc) et peu de prélèvements sur l'énergie (avec une exception pour l'énergie des transports en France).

Devenir sobre énergétiquement implique nécessairement de détaxer le travail et de taxer l'énergie (voir par exemple La Jaune et La Rouge de 1998, [fiscalité et environnement](#)). Le travail étant moins taxé, il se créerait plus d'emplois, probablement essentiellement dans les catégories d'emplois peu qualifiés.

Des résultats partiels d'études sectorielles étayaient cette (hypo)thèse :

➤ certaines études montrant que les hypermarchés de périphérie urbaine sont deux fois plus consommateurs d'énergie par unité de CA vendue que les supermarchés de centre-ville montrent aussi que lesdits hypermarchés sont aussi ... deux fois moins inducteurs d'emploi dans l'économie par unité de CA vendue, ce qui semble accréditer la thèse que "contenu en énergie élevé" et "contenu en emplois élevé" sont ici antagonistes,

➤ Une étude de l'[INRETS](#) a également montré que le déplacement d'un voyageur sur un kilomètre en automobile consomme deux fois plus de pétrole et crée deux fois moins d'emplois que le même déplacement en bus.

➤ Une étude plus complète de l'[Oko-Institut](#) (en Allemagne) aboutit à la conclusion que de pénaliser le transport automobile, ce qui est favorable à la baisse des consommations énergétiques, crée 2,5 fois plus d'emplois qu'il n'en détruit (on peut [télécharger ici](#) le résumé de l'étude au format PDF)

➤ Dans un autre registre, une étude (publiée dans les Echos mais je ne me rappelle plus la source) a montré que l'agriculture bio était plus riche en emplois que l'agriculture traditionnelle à production égale.

➤ Une étude partielle (citée soit dans Les Echos, soit dans Libération, soit dans Le Monde durant l'été 2000, mais je n'ai pas conservé l'article...) indique que la desserte d'une localité par une autoroute peut s'avérer être une mauvaise affaire pour l'emploi dans les petites entreprises et l'artisanat (concurrencés par les grosses entreprises lointaines, utilisant beaucoup de machines et d'énergie) ainsi que pour l'emploi local (concurrencé par la main d'oeuvre lointaine à bas prix).

► Moins de bruit

Le bruit est en grande partie causé par l'utilisation de l'énergie, que ce soit des transports, des usines, des engins de chantier, etc. Un monde plus sobre énergétiquement serait très vraisemblablement beaucoup moins bruyant que notre monde actuel. En Europe, 22% de la population est exposée au bruit des transports à un niveau qui dépasse 65 dBA de jour (source [INRETS](#)).

La voiture et les camions se taillent la "part du lion" dans ces nuisances : 90% des gens qui se plaignent du bruit des transports en France incriminent le bruit de la route.

► Moins de pollution locale

➤ Une bonne partie des polluants locaux sont associés à l'utilisation de l'énergie fossile, que ce soit dans les voitures, dans les usines, ou dans les centrales électriques à charbon, à pétrole ou à gaz : NO_x (oxydes d'azote), SO₂ (dioxyde de soufre), CO (monoxyde de carbone), O₃ (ozone), hydrocarbures divers, dérivés benzénés, particules, etc,

➤ Une autre partie des polluants locaux dérive de l'utilisation de la voiture, sans être directement dérivés de la combustion : poussière des routes, usure des composants de la voiture (pneus, garnitures de freins, etc) notamment.

Dans un monde où il y aurait moins de combustion (car les combustibles renouvelables ne peuvent totalement substituer les combustibles fossiles, sinon cette assertion est fausse, car un feu de bois c'est une grosse cigarette !) et moins de véhicules particuliers, il est fort probable que ces deux sources de pollution seraient nettement diminuées (à niveau technologique constant, bien sûr).

► Moins de congestion

La congestion provient essentiellement de l'utilisation d'un grand nombre de moyens de transport individuels. Si les transports deviennent essentiellement collectifs ou individuels légers (vélos, rollers, etc), une bonne partie de la congestion disparaîtra. Par contre faire des [voitures électriques](#) en nombre égal aux voitures à moteur à explosion n'influe en rien sur ce problème.

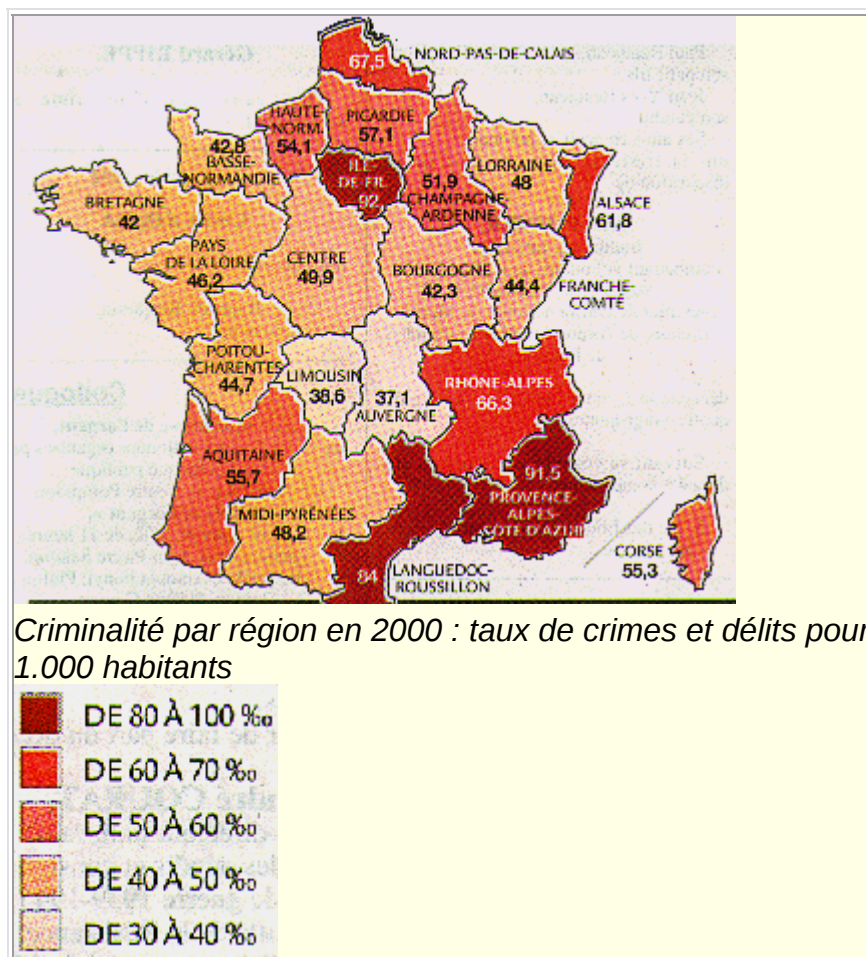
En outre la congestion se produit essentiellement dans les très grandes agglomérations, dont l'existence même n'est pas compatible avec la vertu énergétique, puisque la vie n'y est possible qu'en important toutes les denrées de première nécessité "d'ailleurs", avec du transport longue distance à la clé.

► **Probablement moins de stress**

Le "toujours plus vite, toujours plus gros" qui gouverne actuellement l'économie des pays riches étant le moteur essentiel de l'augmentation des consommations énergétiques, consommer nettement moins d'énergie ne permettrait plus cette démarche. Or une partie du stress actuel est lié à ce "toujours plus vite". Il est bien connu qu'en vacances on "prend son temps", etc.

Une société énergétiquement vertueuse nous mènerait donc probablement, comme produit dérivé, un peu moins de stress.

Notons par ailleurs, en liaison avec le § précédent, que la criminalité en France est corrélée au pourcentage de la population habitant dans des grandes villes.



Une population répartie de manière plus homogène sur le territoire serait donc peut-être moins criminogène, ce qui peut être considéré comme le reflet d'un peuple globalement plus heureux de ses conditions de vie. Dans la même veine, on peut aussi noter que remplacer l'énergie par de l'huile de coude (qui est une des composantes de l'affaire, voir plus bas) fatigue, et quand on est fatigué, l'envie de faire le Zouave tend à diminuer !

Ce qui changerait probablement, sans que ce soit obligatoirement une perte ou un gain

► **Une gestion décentralisée de l'énergie**

Une partie significative des apports énergétiques provenant de renouvelables dans un tel monde, qui ne sont intéressantes que si elles sont produites localement, nous aurions tous un dispositif local de production net de gestion de l'énergie (panneau solaire, chaudière à bois en milieu rural, éolienne parfois comme au bon vieux temps du far-west, pile à combustible réversible comme dispositif de stockage, régulation optimale par site, etc).

Le réseau serait autant là pour lisser les disparités que pour acheminer l'énergie.

► **Plus de télécommunications ?**

On peut penser qu'une société énergétiquement vertueuse nécessiterait un report du déplacement des objets et personnes vers le déplacement des informations. Cela requiererait donc des infrastructures de télécommunications importantes, et le [télétravail](#) se développerait peut-être.

Mais pour l'heure ces infrastructures servent à obtenir plus de services tout en se déplaçant physiquement autant : j'achète une bouteille de vin chez Houra, puis mon lait chez Téliemarket, puis un livre chez Amazon, mais je continue d'aller au supermarché pour le reste à la même fréquence, ou j'en profite pour aller voir mes parents en voiture...

Cela correspond alors à une augmentation de la dépense énergétique par individu, même si l'intensité énergétique de chaque service pris isolément peut effectivement décroître dans un tel contexte.

Notons aussi que le premier effet des infrastructures de télécommunications est d'ouvrir une fenêtre sur le monde, ce qui élargit le référentiel d'un individu et peut lui donner envie de consommer des choses dont il n'avait pas envie avant.

Enfin utiliser moins d'énergie suppose d'utiliser plus d'huile de coude : actuellement on peut mettre 70% de la population dans des bureaux parce les 30% restant peuvent, grâce à des machines, produire les biens matériels que nous utilisons. Mais en 1900, quand la consommation d'énergie par habitant était le dixième de ce qu'elle est aujourd'hui, 80% de la population était aux champs, donc travaillait avec ses mains.

Si la consommation d'énergie diminue, ne verrait-on pas certain retour au travail manuel, qui n'a pas vraiment besoin d'infrastructures de télécoms pour prospérer ?

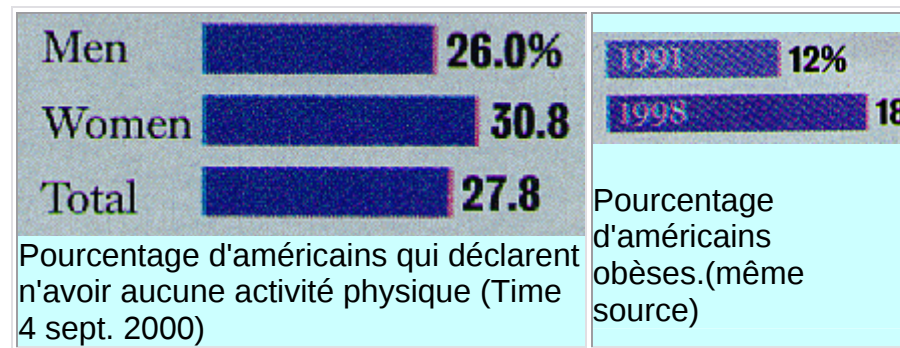
► Plus d'exercice physique

Moins recourir à la force motrice de l'énergie supposerait probablement de réutiliser un peu nos muscles, notamment pour se déplacer (marche, vélo).

► Inconvénient pour certains : c'est fatigant !

► Avantage : c'est de l'exercice quotidien. Précisément parce que c'est fatigant, nous serions plus sveltes et mieux portants (et de manière certaine moins stressés : l'exercice physique à dose raisonnable est un facteur d'équilibre). Aux USA (où une personne sur deux est obèse ou surpondérée), le seul facteur parfaitement corrélée avec l'obésité est le nombre de voitures en circulation ([lire l'article où cette corrélation est exposée](#)).

Un autre article (Time, 4 septembre 2000) donne les chiffres suivants pour l'inactivité physique et l'obésité aux USA:



► Plus de déplacements en transports en commun

Le fait que ce soit agréable ou désagréable varie selon les individus. Personnellement, si je considère le cas du RER que j'emprunte quand je vais à Paris (le RER B), chauffé l'hiver, fiable, silencieux, me permettant de lire et d'écouter mon walk-man (et de m'endormir quand je reviens de Paris le Samedi soir après avoir trop bu sans rentrer dans un platane), je considère que c'est plutôt plus confortable - et infiniment moins stressant, même avec les quelques SDF qui y font la manche - que d'y aller en voiture.

► Une modification de l'emploi du temps quotidien

Les auxiliaires mécanisés nécessitant beaucoup d'énergie, la part relative de l'emploi du temps consacrée à les utiliser devrait baisser. Devraient donc augmenter en proportion du temps éveillé :

► le travail manuel : un monde vertueux n'est pas nécessairement un monde à l'économie dématérialisée, il est même possible que ce soit le contraire. Au début du siècle, l'économie était parfaitement matérielle, et pourtant la consommation d'énergie par individu était bien moindre.

- les activités personnelles extensives (bricolage, jardinage, etc) sous réserve qu'elles nécessitent peu de mécanisation,
- la formation et les distractions culturelles,
- les discussions et la vie associative,
- le cas du transport est non tranché : à nombre de déplacements égal, il devrait nécessiter plus de temps, mais peut-être que dans un tel monde on se déplacerait moins.

Quels sont les comportements actuels de la puissance publique qui sont incompatibles avec un objectif à terme de vertu énergétique ?

Dans les discours de la puissance publique, dans n'importe quel pays développé au moins, deux thèmes sont fréquemment abordés :

- il faut lutter contre l'effet de serre ou réaliser des économies d'énergie.
- il faut encourager la croissance de l'économie.

La quasi-totalité des mesures prises au nom du deuxième objectif est aujourd'hui [parfaitement incompatible avec le premier](#).

Sans se placer le moins du monde sur le terrain de la morale, **un certain nombre de comportements sont donc parfaitement incompatibles avec un objectif encore plus large de "vertu" énergétique.**

On peut rappeler à cette occasion que le monde économique n'est pas le monde réel mais simplement une représentation conventionnelle (c'est à dire basée sur un certain nombre de règles que l'on se donne) du monde réel. Faire passer le monde

économique avant le monde réel, c'est faire primer la convention sur la réalité, chose que l'église adorait faire, mais qui devrait désormais un peu passer de mode en Occident !

► **Libéraliser l'énergie électrique toutes choses égales par ailleurs**

Libéraliser la distribution de l'électricité, laquelle est essentiellement produite à base de combustibles fossiles (même dans le monde développé), a un objectif affiché : satisfaire le consommateur. Traduction : il s'agit de faire baisser les prix. La lecture des réactions à ce qui s'est passé en Californie en 2001, où les prix ont monté suite à une libéralisation, montre bien que ce n'était pas le résultat attendu.

Or faire baisser les prix conduit généralement à augmenter les consommations, avec des émissions de gaz à effet de serre qui augmentent encore plus vite (car les productions marginales sont faites avec des centrales à gaz ou à charbon, les moins chères à l'achat, et qui produisent plein de CO₂).

Toutes choses égales par ailleurs (c'est à dire sans contrainte explicite sur les émissions de CO₂ prévue dès le départ), une libéralisation de la distribution d'électricité est [incompatible avec la lutte contre l'effet de serre](#) et donc avec la "vertu énergétique".

Le même raisonnement d'applique au [gaz](#), dont on envisage aussi de libéraliser la distribution.

► **Sortir du nucléaire à court terme (et même à moyen terme)**

A consommation électrique constante ou croissante le fait de ne plus avoir de centrales nucléaires requiert de produire l'électricité autrement. Le potentiel de l'[éolien](#), du [solaire](#) et de la [biomasse](#) étant limités à court terme (et pour certains à terme également) cela engendrera un recours accru aux énergies fossiles (voir [article que j'ai écrit dans Les Echos le 7 juillet 2000](#)).

La sortie du nucléaire à court ou moyen terme - et à long terme nous sommes tous morts, disait Keynes ! - n'est donc pas compatible avec un souhait de "vertu énergétique".

► **Ne pas augmenter les prix de l'énergie quand ils sont ridiculement bas...**

Cas des USA par exemple, qui ont des taxes sur les produits pétroliers très faibles, et qui font deux fois plus de CO₂ par habitant que la France, qui a des taxes sur les produits pétroliers élevées.

► **...ou les baisser pour faire plaisir à l'électeur (ignorant)**

Une baisse des prix toutes choses égales par ailleurs fait monter les consommations à court terme : c'est l'une des seules lois de l'économie à peu près solides (le cas récent de la vache folle montre bien qu'il faut que l'on ait "toutes choses égales par ailleurs" : si le contexte change, on peut avoir à la fois une baisse des prix et une baisse des consommations).

Dans le même esprit, la suppression de la vignette automobile, et plus généralement tout ce qui contribue à faire baisser le coût relatif de la voiture, favorise ce mode de déplacement, donc augmente à la fois les émissions et la difficulté à faire autrement plus tard.

La baisse des taxes sur le fioul encouragera aussi ce mode de chauffage, etc.

► **Encourager la consommation de biens matériels**

L'augmentation en volume de la production industrielle - qui engendre une augmentation en volume des consommations énergétiques - est incompatible avec un objectif de "vertu énergétique". En prolongeant les tendances mondiales actuelles, on arrive assez vite à des [résultats](#) qui laissent songeur.

La vertu énergétique n'est donc pas compatible avec le fait de jauger la bonne santé d'une nation à l'aune de la croissance de certains indicateurs tels que production manufacturière en volume, consommation des ménages en produits manufacturés en volume, etc.

En particulier, avec la structure actuelle de l'activité des pays développés, [la vertu énergétique n'est pas compatible avec la croissance économique](#).

On pourrait imaginer de faire cohabiter une croissance en valeur avec la vertu énergétique, puisque l'économie n'est qu'une convention. Par contre on ne peut pas faire cohabiter des croissances en volume - qui représentent le monde physique - avec la vertu énergétique.

► **Encourager le transport aérien**

Le transport aérien est le mode le plus gourmand en carburant par personne transportée (cf. [ci-dessus](#)). Aller vers un monde énergétiquement vertueux suppose donc, en particulier, de ne pas construire encore des aéroports, ni de réaliser des extensions des aéroports existants.

Application à un cas particulier : la lutte contre l'effet de serre est strictement incompatible avec la construction du [3è aéroport parisien](#), ou avec celle de toute infrastructure permettant l'augmentation du trafic.

Un corollaire de cette conclusion est également que la vertu énergétique est incompatible avec le développement du tourisme international lointain.

► Continuer à construire des infrastructures routières

L'efficacité énergétique du transport de marchandises par rail est 4 fois supérieure à celle du transport par camion ; elle est 3 fois supérieure à celle du transport en voiture dans le cadre des personnes (ci-dessus, & [La Jaune et La Rouge de Mai 2000, Benjamin DESSUS](#))

Il n'est donc pas compatible avec la "vertu énergétique" de continuer à construire des infrastructures routières (autoroutes, voies à grande vitesse, mais aussi rues élargies, rocade périurbaines, etc) destinées à augmenter les vitesses de déplacement en voiture ou à rendre plus compétitif le transport par camion (la durée de vie des infrastructures routières est de l'ordre de 100 ans).

Le confort de circulation est certes temporairement accru quand on fait des rocades, mais l'augmentation de la consommation énergétique (non temporaire, elle) l'est tout autant (cf. [graphique](#) quelques paragraphes plus haut).

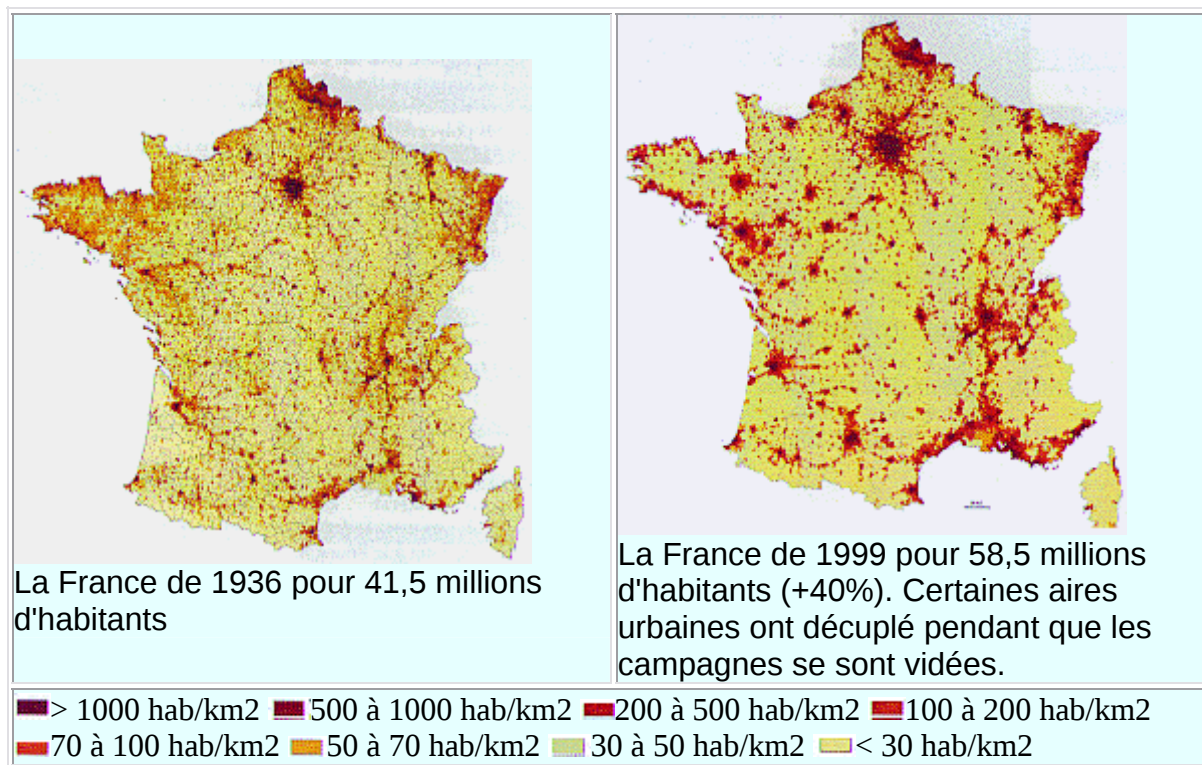
Il n'est pas plus compatible avec la vertu énergétique de faire de la route les premiers postes budgétaires des contrat de plan État-Région (ce qui est le cas à peu près partout en cette année 2000).

Il serait du reste intéressant de connaître l'avis du Conseil d'État de l'assertion suivante : sachant que (1) pour ce que l'on en connaît la croissance de l'effet de serre est contraire à l'utilité publique, (2) la construction d'infrastructures routières, quelles qu'en soient les motivations à court terme ("désenclavement" par exemple, terme à la mode) engendre une croissance du transport routier générateur d'effet de serre, ne devrait-on pas être amené à prendre en compte cet effet lorsque l'on évalue l'utilité publique de nouvelles routes, autoroutes et autres rocades, qui pourraient parfaitement, au nom de la lutte contre l'effet de serre, être déclarée de "non-intérêt public" ?

Et, de façon plus générale, ne faudrait-il pas introduire ce critère dans l'évaluation de l'utilité publique de toutes les infrastructures, par exemple pour celle des aérodrômes, etc. ?

► Encourager la périurbanisation

La périurbanisation est la phénomène par lequel les agglomérations s'étendent en superficie, sans qu'elles gagnent nécessairement beaucoup d'habitants par ailleurs (la démographie en France croît moins vite que les occupations foncières). Cet étalement est patent (cf. figures ci-dessous).



Cela correspond pour une large part à une superficie occupée par habitant qui croît :

- l'habitat individuel consomme plus de ressources foncières par occupant que l'habitat collectif,
- un habitant en banlieue mobilise plus de ressources foncières pour ses déplacements (emprise des routes, voies de RER, etc) qu'un habitant de ville centre,
- je n'ai pas fait le calcul mais je suis prêt à parier qu'une activité commerciale en banlieue occupe plus de surface à CA égal qu'une activité en centre ville (locaux plus horizontaux, surfaces de parkings supplémentaires, nécessité de réaliser des voies d'accès spécifiques, etc).

Cela encourage un double accroissement de la consommation énergétique :

- on fait plus de km journaliers en banlieue qu'en centre-ville.

Variables étudiées	Ville-centre	Banlieue	Périphérie urbaine	Périphérie rurale
Voitures pour 100 ménages	89	110	129	136
% de diesel	24	26	31	36
Âge moyen des voitures en années	6,6	6,7	7,5	NS
Distance moyenne au travail en km	8,5	12,2	15,7	16
Distance par adulte et par jour en km en voiture conducteur, en province	11	18	19	23
Idem, en Ile de France	7	13	21	30
(1) Source : L. Hivert, " Le parc automobile des ménages en décembre 1994 ", INRETS/ADEME.				

(2) Source : P. Martin et G. Rennes, " Le parc automobile des ménages ", INSEE Résultats n° 569 à 571. Champ : grandes agglomérations de province, année 1994.
 (3) Source : J.-P. Orfeuil, " Les déplacements domicile travail dans l'enquête transports ", INRETS.
 (4) Source : C. Gallez et J.-P. Orfeuil, travaux en cours sur l'enquête transports.

➤ on occupe un habitat qui nécessite plus d'énergie pour parvenir à une température identique (maison contre appartement), puisqu'à volume égal la surface de murs en contact avec l'extérieur est supérieure.

Localisation	Paris		Ensemble HLM petite couronne		Lotissement pavillonnaire grande couronne	
Type de logement	Neuf	Ancien (1)	Neuf	Ancien	Neuf	Ancien
Chauffage	3,82	6,74	3,36	5,93	4,52	10,17
Autres consommations (2)	3,26		3,26		3,26	
Entretien des bâtiments et de la voirie	0,31		0,6		0,95	
Déplacements	3,27		10,39		11,66	
Total	10,66	13,59	17,61	20,19	20,39	26,04

Emissions de gaz à effet de serre (par an) rapportées au m² habitable pour divers types d'aménagements urbains. Tous les chiffres sont en kg d'équivalent carbone. Auteur : Jean-Pierre Traisnel & al, Les cahiers du CLIP, avril 2001

(1) avec réhabilitation minimum (doubles vitrages, isolation).

(2) eau chaude sanitaire, cuisson, etc

Comme en banlieue les surfaces par habitant sont généralement plus importantes, il en résulte qu'en prenant tous ces facteurs en compte (plus de déplacements, plus de m2, logements plus gourmands en énergie par nature) les émissions par habitant pour le total logement + déplacements vont du simple au double.

Localisation	Paris		Ensemble HLM petite couronne		Lotissement pavillonnaire grande couronne	
Type de logement	Neuf	Ancien (1)	Neuf	Ancien	Neuf	Ancien
M2 par habitant	33		28		39	
Emissions liées au bâtiment (chauffage, entretien etc)	244	340	200	275	340	560
Emissions liées aux déplacements	108		290		455	
Total	352	448	490	565	795	1015

Emissions de gaz à effet de serre par habitant et par an pour divers types d'aménagements urbains. Tous les chiffres sont en kg d'équivalent carbone. Auteur : Jean-Pierre Traisnel & al, Les cahiers du CLIP, avril 2001

(1) avec réhabilitation minimum (doubles vitrages, isolation).

(2) eau chaude sanitaire, cuisson, etc

Il en résulte que l'encouragement de la périurbanisation est incompatible avec le souhait de maîtriser les consommations énergétiques, et notamment les mesures suivantes sont incompatibles avec la "vertu énergétique" :

- la création de ZAC à la périphérie des villes,
- la création de banlieues résidentielles à la périphérie des villes,
- la création de voies de circulation périurbaines (qui sont en général le prélude à une urbanisation desservie uniquement par la voiture), quels que puissent en être les vertus revendiquées à court terme,
- le prêt à taux zéro, qui ne porte que sur des logements neufs avec un faible coût de foncier, et donc ne permet l'accession à la propriété qu'en périphérie, ce qui concourt à l'étalement urbain (si on ajoute que les logements construits sont très vite dépréciés, le prêt à taux zéro s'assimile plus à une mesure de soutien au bâtiment qu'à une mesure réelle en faveur des ménages modestes).

► **Encourager le tourisme lointain**

Eurodisney est devenu la première destination touristique d'Europe (12 millions de visiteurs par an). Pour venir, un visiteur se déplace. Tous les touristes venant de destinations lointaines (par avion) engendrent des émissions lors de leur déplacement. Si 6 millions (sur 12) viennent par avion (ce qui doit être conservateur), avec une dépense carbone moyenne de 200 kg par visiteur (soit 50% d'Europe et 50% d'ailleurs), cela représente 1.200.000 tonnes de carbone, soit les émissions de 600.000 Français (ou encore 30% des émissions parisiennes intra-muros).

De tels projets sont donc rigoureusement incompatibles avec un souhait de "vertu énergétique".

► **Encourager l'élevage**

La production de viande engendre des émissions de [gaz à effet de serre](#) par unité de poids bien plus importantes que la culture de végétaux (pas seulement du CO₂). Pour produire un kg de boeuf avec os on engendre en gros 80 fois plus d'émissions de gaz à effet de serre que pour produire un kg de blé.

Les subventions à l'élevage (une bonne partie des subventions de la PAC) sont donc incompatibles avec la vertu énergétique.

► **Ne pas affecter 20% de nos impôts à l'aide aux pays en développement**

Les pays en développement, qui consomment globalement 6 à 10 fois moins d'énergie par habitant que nous, ont une aspiration - que nous ne saurions leur contester au nom de la morale (on peut le faire au nom de l'égoïsme, mais alors il faut le dire !) - à en consommer pas beaucoup moins que nous.

On ne pourrait les en empêcher qu'en instaurant une dictature mondiale, avec des chances de succès aléatoires sachant qu'un certain nombre ont l'arme atomique ; une analyse de ce genre de régime montre en outre que le bonheur de vivre des geoliers n'est pas toujours beaucoup plus élevé que celui des détenus.

Or si les pays "en développement" (qu'est-ce que le développement ?) s'équipent avec les technologies les moins capitalistiques ou les plus compétitives à court terme pour la fourniture d'énergie, ils vont essentiellement s'équiper de centrales à charbon et de voitures à pétrole, contribuant ainsi à accélérer la disparition des ressources fossiles (puisque le niveau de stock est fixé une fois pour toutes) et les émissions de gaz à [effet de serre](#), deux phénomènes dont les conséquences ne sont pas localisées chez le "fauteur".

Au nom d'un égoïsme bien compris, nous devrions les financer massivement pour qu'ils s'équipent avec du solaire, du nucléaire, des transports en commun (qui nécessitent des investissements collectifs plus lourds que la voiture), bref qu'ils bénéficient des avancées technologiques majeures rapidement au lieu de commencer par l'étape "fossile".

Cela justifierait parfaitement

➤ l'affectation d'une part très significative de nos impôts à aider les pays pauvres : nos impôts ne sont-ils pas destinés à préparer notre avenir, qui ne saurait être rose si les émissions de gaz à effet de serre explosent ?

➤ que l'on cesse de considérer comme des bonnes nouvelles les succès de Renault, d'Alstom (pour les centrales à charbon) et d'Airbus à l'exportation...

► **Ne pas mettre de barrières douanières aux produits importés des USA**

Une des manières de sanctionner les USA pour leurs grosses émissions de gaz à effet de serre serait de leur mettre des barrières douanières à l'entrée de l'Europe. Les toucher au portefeuille sera bien plus efficace que de crier haut et fort que ce sont des affreux jojos.

Quelles sont les conséquences possibles pour l'économie d'un choix de sobriété énergétique ?

► **Cela devrait avantager les petites entreprises et désavantager les grosses multinationales**

Les grosses multinationales ont comme modèle d'organisation de produire de manière massivement mécanisée en deux ou trois endroits dans le monde, de spécialiser les sites de production, pour après transporter leur production semi-finie ou finie dans le monde entier. Cela est une conséquence du travail cher dans les pays occidentaux et du transport pas cher.

Or deux de ces modalités d'organisation ne pourraient subsister dans un monde énergétiquement vertueux :

➤ La mécanisation massive, sa disparition entraînant du même coup la perte d'une partie des économies d'échelle lors de la fabrication,

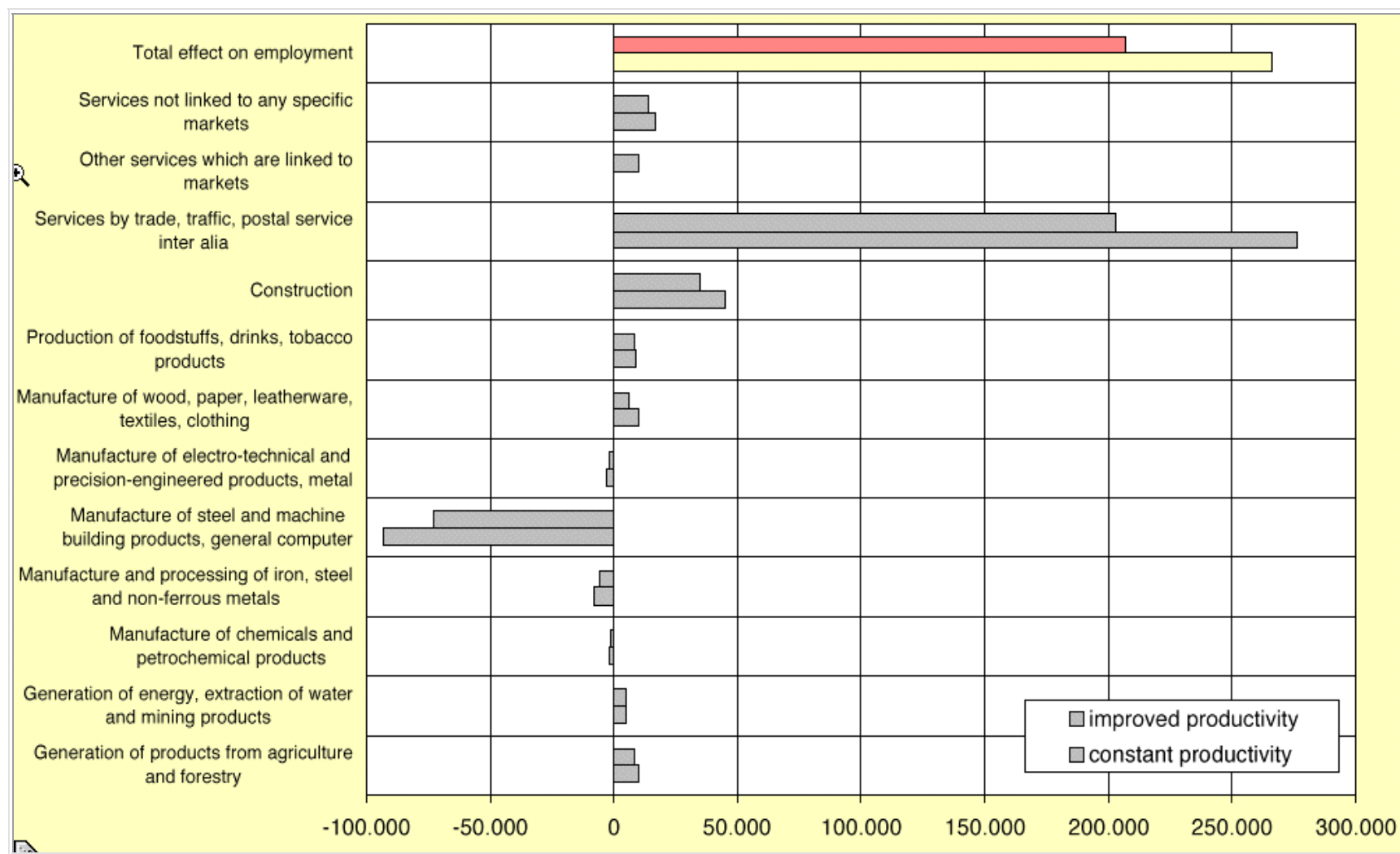
➤ le recours au transport longue distance.

La vertu énergétique obligerait les grandes entités à produire plus "local" et de manière moins mécanisée, ce qui leur ferait perdre une partie de leurs économies d'échelle. Cela avantagerait comparativement les petites entreprises.

► Cela devrait pénaliser l'emploi dans l'industrie manufacturière et avantager l'emploi dans les services

Cette assertion paraît logique a priori, mais pour en avoir le cœur net l'institut allemand Oko Institut (voir ci-dessus) a chiffré et détaillé cet impact en partant de l'hypothèse d'une pénalisation financière accrue des transports routiers en Allemagne, avec un ensemble d'autres hypothèses qui ne sont pas constitutives d'une rupture technologique ou sociétale ; il s'agit juste d'un ensemble d'inflexions (on peut [télécharger ici](#) le résumé de l'étude au format PDF).

Le bilan est donné ci-dessous ; il est explicite quand à l'assertion en titre : l'industrie manufacturière perd des emplois, les services en gagnent.



Une étude plus large serait bien entendu intéressante...

► **Cela devrait avantager le bâtiment et désavantager les travaux publics**

➤ On fera moins d'infrastructures, inductrices de consommation énergétique (aéroports, routes, etc), donc cela désavantagera les TP,

➤ On aura besoin de plus de bras pour faire la même chose en construction neuve, puisque l'énergie sera moins abondante, donc cela avantagera le secteur du bâtiment du point de vue de l'emploi (cette assertion est cohérente avec l'impact sur l'emploi du graphique ci-dessus),

➤ Le soin particulier qu'il serait nécessaire d'apporter à l'isolation thermique, notamment du parc existant de logements, à l'entretien des installations individuelles de production énergétique (panneaux & chauffe-eau solaires, piles, etc) engendrera une activité importante chez les artisans du bâtiment.

► **Cela devrait pénaliser la vente de produits manufacturés et avantager les activités de location**

Si le prix de production des matériaux de base augmente (car là réside l'essentiel de la consommation énergétique des entreprises), le prix relatif des produits manufacturés augmentera. Par contrecoup, la location des biens (et leur réparation) deviendra plus compétitive.

► **Cela devrait pénaliser les transporteurs et avantager les logisticiens**

Si le prix relatif du transport augmente (conséquence économique de sa rareté) les entités chargées de gérer finement les - faibles - capacités disponibles devraient voir leur activité augmenter.

► **Cela devrait faire disparaître les flux tendus et recréer des stocks**

L'énergie dépensée par unité de masse décroît en fonction du tonnage transporté en une seule fois. Le transport de petites quantités à la demande, ce qui est très gourmand en énergie, mais qui est une des composantes essentielles du flux tendu, disparaîtrait donc, ce qui engendrerait la nécessité de recréer des stocks.

► **Cela devrait pénaliser le commerce international et avantager l'économie locale**

Cela semble logique : le transport devenant plus cher, tout ce qui est riche en transports (par exemple le commerce international) deviendra moins compétitif. Si le commerce international devient moins compétitif, cela avantage par contrecoup tout ce qui est local : si la première composante d'une chemise fabriquée en Chine est son coût de transport, cela redonne une chance à la fabrication française !

► **Cela devrait avantager le commerce de centre ville et désavantager les grandes surfaces de périphérie**

Cela est une simple conséquence de l'item exposé plus haut indiquant que les grandes surfaces de périphérie sont plus intensives en énergie à CA égal que les petits commerces en ville. La construction d'hypermarchés est donc incompatible avec la vertu énergétique.

► **Cela devrait pénaliser le tourisme international et avantager le tourisme de proximité**

Cela est une conséquence logique de la diminution de la mobilité physique, notamment lointaine.

► **Cela devrait pénaliser les producteurs d'énergie et avantager les installateurs de dispositifs personnels (panneaux solaires, piles à combustibles personnelles, etc).**

Cela résulterait de la double conséquence d'une augmentation du prix de l'énergie et d'une fraction plus importante provenant de renouvelables gérées localement ; il est donc logique que les producteurs d'énergie actuels ne soient pas favorables à la sobriété énergétique, la reconversion comme fabricants de matériel n'étant pas facile à mettre en oeuvre. Cela étant, maintenir une abondance énergétique pour le seul fait de ne pas heurter les gros producteurs d'énergie est équivalent à maintenir un impôt pour le seul fait de ne pas fâcher les fonctionnaires qui le perçoivent...

► **Cela avantagerait l'activité informatique ?**

► la nécessité de recourir aux échanges d'informations plutôt que de personnes requerrera de disposer de plus d'infrastructures de télécommunications, de plus de terminaux individuels, et de plus d'activité logicielle,

► le développement informatique est une activité qui est en soi assez peu gourmande en énergie (ce n'est par contre pas le cas de la fabrication d'ordinateurs).

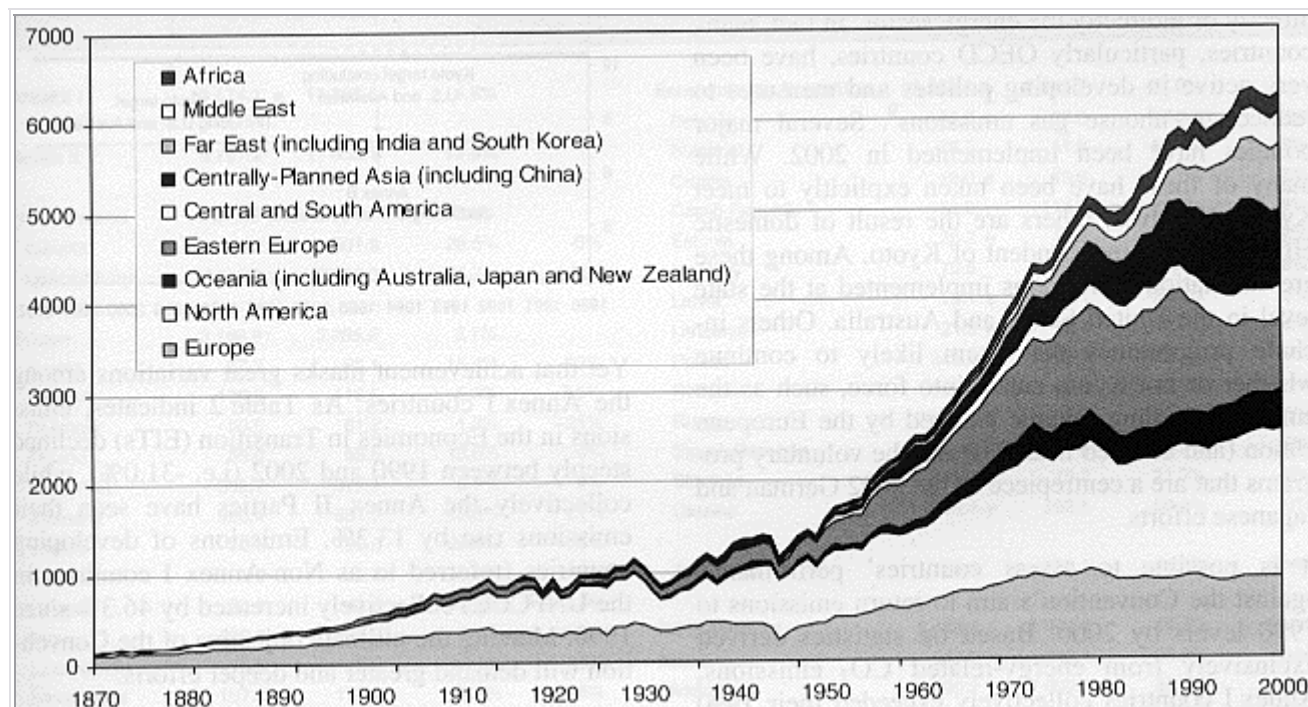
► par contre l'activité informatique, à ce jour, a essentiellement été mise au service de l'augmentation de la productivité industrielle. L'activité "sobre" serait plutôt celle qui n'a qu'elle-même comme finalité (logiciels de jeu, d'éducation, etc) ou celle qui aide à optimiser la consommation énergétique.

La croissance économique "fait-elle de l'effet de serre" ?

dernière version : janvier 2006

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Si nous nous tournons vers le passé, la réponse est incontestablement **oui** : depuis un siècle, le "volume" de l'économie et les émissions de gaz à effet de serre évoluent de la même manière.



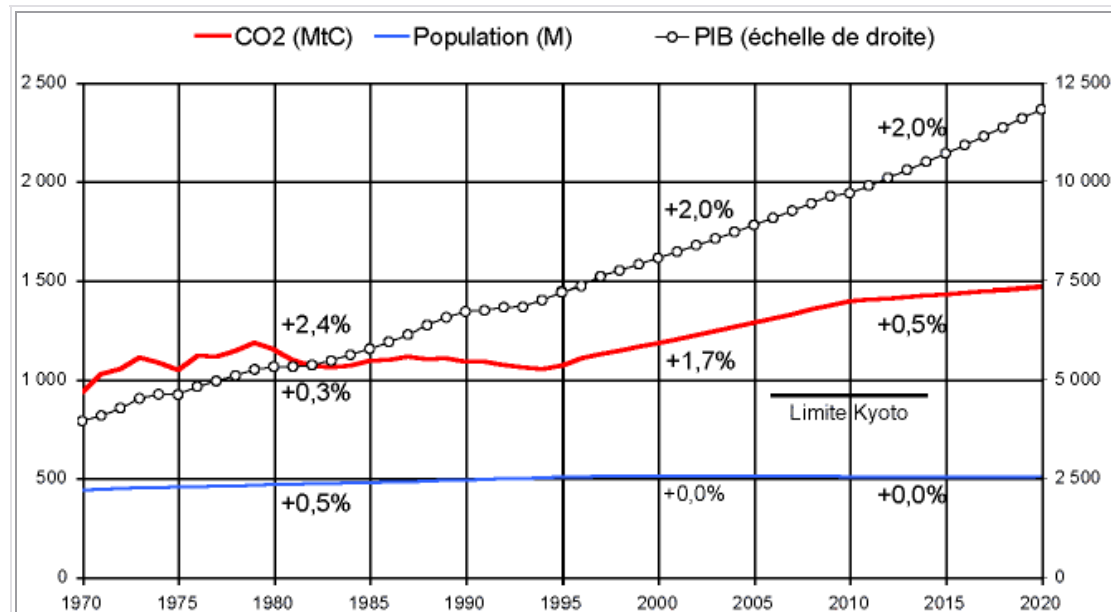
Evolution des émissions mondiales de CO₂ provenant des combustibles fossiles, en millions de tonnes équivalent carbone, de 1870 à 2000.

On constate une corrélation parfaite entre les émissions et la croissance mondiale ou régionale, valable à la hausse comme à la baisse. Pendant les "Trente Glorieuses", épisode de très forte croissance économique, les émissions ont triplé. A l'inverse, les émissions mondiales ont baissé en 1929 (grande dépression ; le PIB mondial s'est contracté de 20% environ), pendant la 2^e Guerre Mondiale, et après les 3 crises économiques importantes de 1974 et 1979 (2 chocs pétroliers), et 1990 (guerre en Irak). Les émissions de l'Europe de l'Est (Eastern Europe) ont spectaculairement baissé (de -30 à -50% selon les pays) après la chute du Mur de Berlin (1989) et la récession majeure qui a

pris place dans ces pays.

Source: Marland, G., TA. Boden, and R. J. Andres, 2003. Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., United States

Si nous nous tournons vers l'avenir, une simulation faite par le Ministère de l'Industrie (ci-dessous) montre qu'avec un modeste 2% de croissance par an en Europe occidentale, si nous ne changeons rien par ailleurs (pas de substitutions entre énergie, et pas de gain d'efficacité énergétique, notamment pour les ménages), les émissions de gaz à effet de serre de l'Europe de l'Ouest feraient un bond de 50% entre 1990 et 2020.



Evolution tendancielle des émissions de CO₂ en Europe de l'Ouest sur la base d'une croissance économique de 2% par an sans modification de la proportion respective des sources d'énergie. La courbe rouge représente les

émissions de CO₂, en millions de tonnes équivalent carbone (axe vertical de gauche), et le trait noir horizontal (à droite) la limite imposée par Kyoto. On voit clairement qu'entre 1995 et 2020 les émissions augmenteraient de presque 50%. On peut bien sûr discuter la qualité de cette prévision, et notamment le fait que les émissions réelles de l'Europe en 2005 sont plus basses que sur ce graphique, mais il n'en reste pas moins que tout scénario pour le futur comportant une croissance économique significative comporte aussi une hausse des émissions, même si une baisse finira par arriver de toute façon.

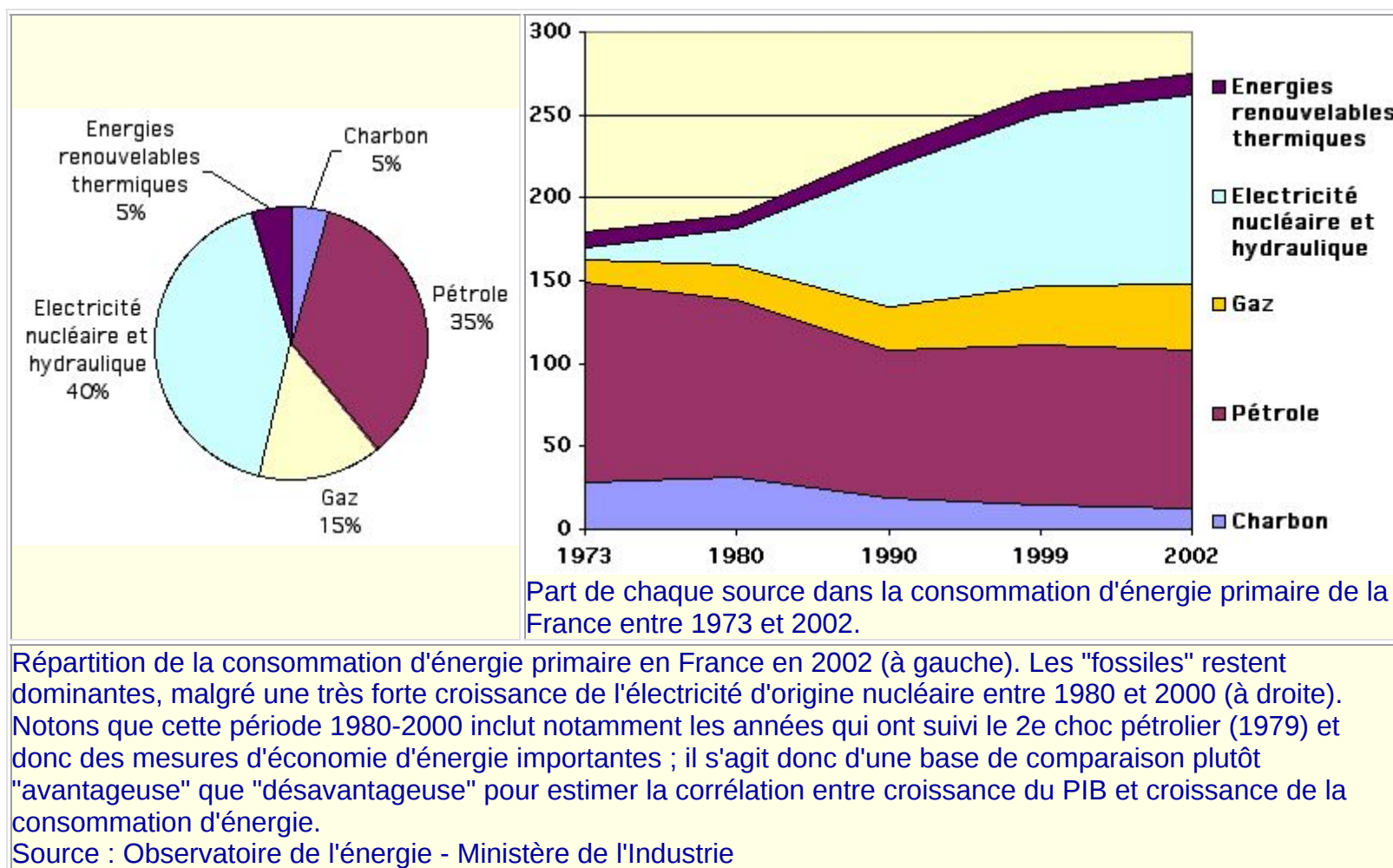
Source : Observatoire de l'énergie - Ministère de l'Industrie

Le résultat de cette simulation est en fait assez facile à "deviner" dès lors que l'on connaît un certain nombre de corrélations qui caractérisent notre activité productive pour le moment :

➤ De 1980 à 2000, chaque point de croissance du PIB en France a engendré quasiment un point de croissance de la consommation d'énergie primaire dans notre pays (pour la signification de "énergie primaire" voir cet [article expliquant quelques notions de base sur l'énergie](#)) et un peu plus d'un demi-point de croissance de l'énergie finale : avec un peu plus de 2% de croissance annuelle de l'économie en moyenne sur ces 20 ans, la consommation d'énergie primaire a augmenté de 1,75% par an en moyenne, et la consommation d'énergie finale de 1,3% par an.

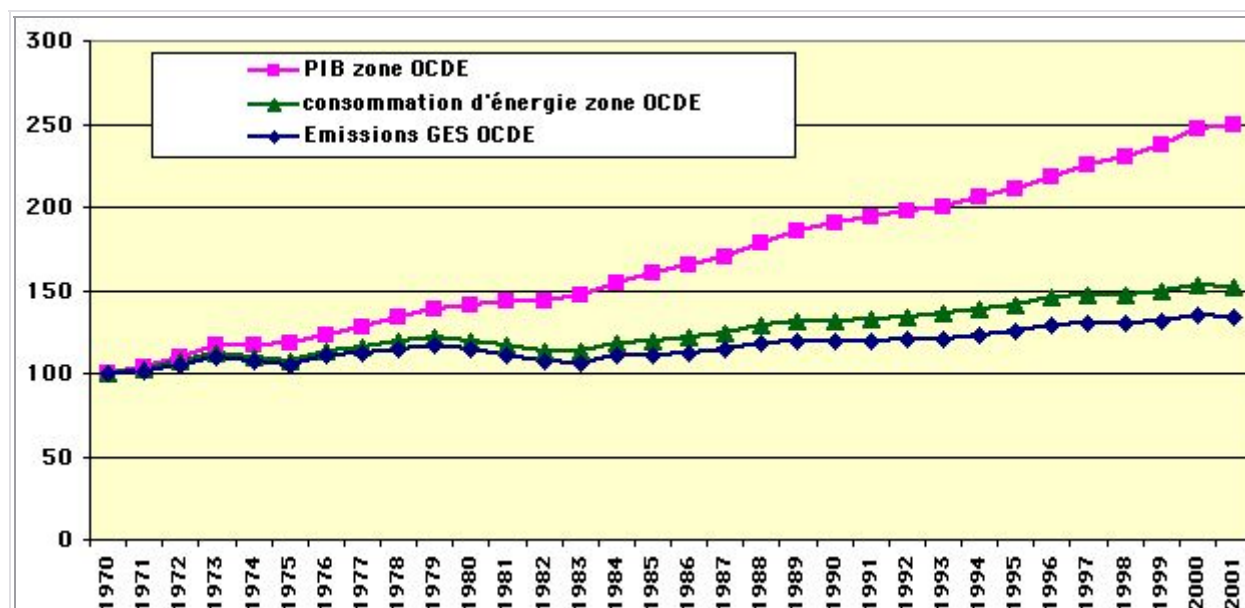
➤ en particulier, avec chaque point de croissance de l'économie est allé un point de croissance de la consommation d'énergie dans les transports (en France), et les transports consomment quasi-exclusivement du pétrole (et inversement la moitié du pétrole consommé en France sert aux transports).

Plus généralement l'énergie primaire, en France, reste majoritairement "fossile" malgré qu'elle soit "un peu moins fossile que dans les autres pays développés", grâce au programme nucléaire :



Si l'on prolonge la croissance passée vers l'avenir, "toutes choses égales par ailleurs", il y aura donc assez inévitablement une croissance de la consommation d'énergie, et si la décomposition de cette consommation par type d'énergie reste à peu près identique, voire augmente la part des combustibles fossiles (car il semble difficile d'augmenter la part du nucléaire dans l'électricité !), nous aurons assez inéluctablement une croissance des émissions de gaz à effet de serre.

Ce couplage entre hausse de la consommation d'énergie et hausse du PIB se retrouve partout, comme par exemple pour la zone OCDE entre 1970 et 2000, même si le couplage entre économie et énergie primaire est parfois moins fort que du 1 pour 1.

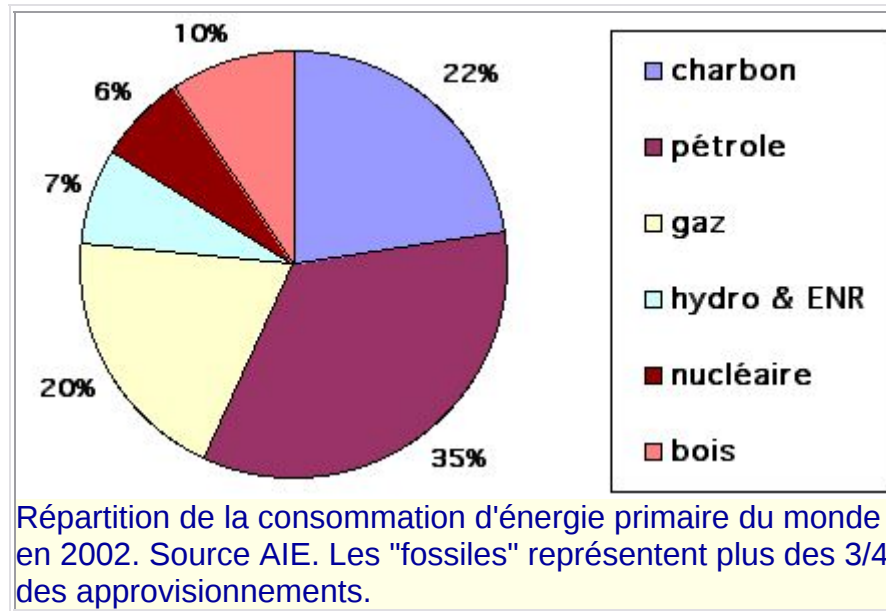


Evolution du PIB, de la consommation d'énergie, et des émissions de gaz à effet de serre des pays de l'OCDE de 1970 à 2001 (normalisés : les trois sont mis à 100 en 1970). Pour un point de croissance économique, on consomme environ 0,5 point en plus pour l'énergie primaire, et 0,3 point en plus pour les émissions. Le fait que la consommation d'énergie augmente moins vite que le PIB conduit souvent des économistes à indiquer que l'on "améliore" les performances de l'économie, mais tout dépend de quel point de vue on se place : effectivement il faut moins d'énergie pour faire 1000 \$ de PIB, mais globalement la consommation d'énergie augmente quand même !

Les diminutions temporaires de la consommation d'énergie qui ont suivi les chocs pétroliers (1973, 1979, 2000) sont bien visibles, ainsi que la moindre hausse des émissions de gaz à effet de serre intervenues ensuite, conséquence de la mise en

route des [programmes nucléaires](#). On notera qu'aux mêmes époques l'économie de la zone OCDE a ralenti mais qu'il n'y a pas eu de récession majeure.
Source BP Statistical review pour l'énergie, OCDE pour le PIB

Et comme l'essentiel de l'énergie mondiale consiste en des combustibles fossiles, dès qu'il y a croissance économique il y a hausse des émissions de gaz à effet de serre.



Une première conclusion de cette affaire est donc que si l'on veut gagner la bataille contre le changement climatique, il semble assez inévitable de [modifier le "contenu de la croissance"](#), ou d'aller vers la voie de la "décroissance" pendant un moment, au niveau mondial bien sûr.

N'y aurait-il pas une "bonne" croissance permettant de tout concilier ?

Une fois qu'il apparaît que la croissance actuelle n'est pas compatible avec une solution volontaire au problème, la première tentation est bien sûr d'imaginer que nous allons pouvoir trouver la "bonne" croissance, celle qui existe sans endommager l'environnement, car quiconque propose de faire de la décroissance passe facilement, aujourd'hui, pour quelqu'un qui aurait abusé de la vodka (ou du schnaps ou du whisky, allez, je ne suis pas sectaire). Pour savoir si cela est possible de réaliser ce mariage miraculeux, il va nous falloir, hélas pour ceux qui n'aiment pas les chiffres et les définitions austères, regarder d'un peu près la mécanique interne de cette fameuse croissance économique.

En l'occurrence, ce terme concerne l'accroissement annuel du produit intérieur brut (ou PIB), lequel se définit comme la **valeur totale (qui correspond le plus souvent aux prix de marché) des biens et services produits par des activités résidentes et disponibles pour des emplois finals** (c'est barbare, je vous avais prévenu ! mais il faut bien savoir de quoi on cause...). Cette définition est tirée du livre "la comptabilité nationale", de Jean-Paul Piriou, aux Editions La Découverte (2003).

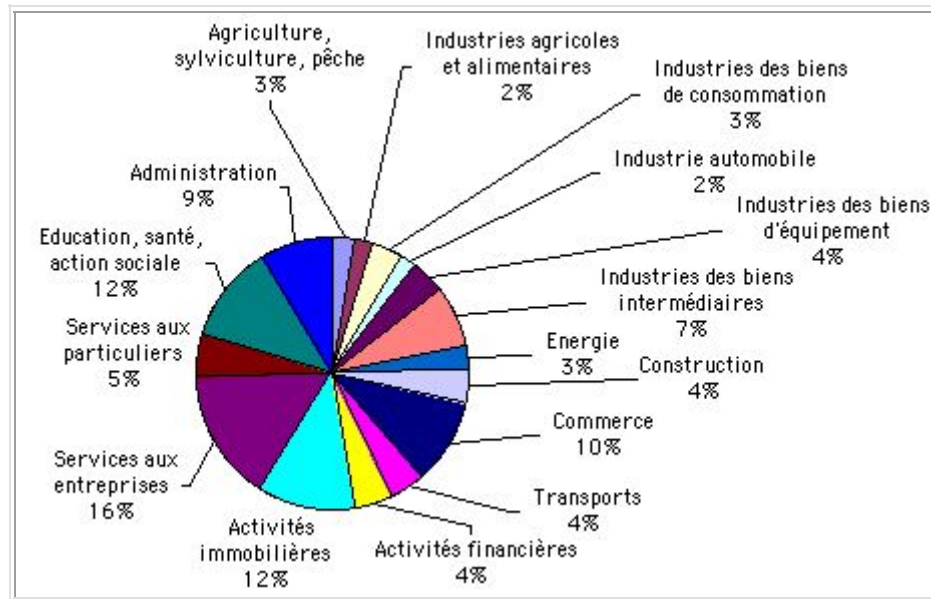
Si nous explicitons un peu cette phrase, voici ce que cela donne :

- les **activités résidentes** sont, en gros, celles qui s'exercent physiquement sur le territoire, peu importe que le capital soit détenu par des français ou des étrangers, que le salarié soit français ou étranger, etc,
- les **biens et services produits**, cela se comprend assez facilement ! Notons cependant qu'il faut, pour que ces biens ou services soient comptés, qu'il y ait une vente ou une contrepartie monétaire quelconque qui prenne place entre la production et la consommation (ce qui ne signifie pas nécessairement que c'est l'utilisateur qui paie le prix, mais juste que "quelqu'un" a payé quelque chose). Echappent ainsi au PIB les activités de production pour compte propre (bricolage, jardinage, garde d'enfants, par exemple). Ainsi, si chaque mère aide son enfant à faire son travail scolaire (personne ne paye), cela ne contribue pas au PIB, mais si chaque mère se fait payer pour aider l'enfant de son voisin, tout en ayant la mère voisine qui vient aider son enfant (de telle sorte que cela est neutre pour les finances d'un ménage : on dépense d'un côté et on encaisse de l'autre), alors cette activité

va contribuer au PIB, bien que la totalité des services fournis soit la même dans les deux cas de figure (ou même ait diminué : se faire aider par ses propres parents est souvent plus agréable que par un(e) étranger(e) !). Inversement, si le jardinage augmente, et que la population achète moins de nourriture auprès de tiers, cela fait mécaniquement baisser le PIB. D'une manière générale l'autoproduction est mécaniquement "mauvaise" pour la croissance.

➤ enfin "**disponibles pour des emplois finals**" signifie que nous n'avons pas affaire à des biens ou services qui seront incorporés dans la production d'une autre activité. En conséquence, cet "emploi final" est essentiellement le fait des ménages et des collectivités de consommateurs, mais il concerne à la fois les dépenses de consommation courante et celles concernant des investissements.

Il se trouve que ce PIB peut également être défini comme la somme des valeurs ajoutées des activités résidentes. La valeur ajoutée se définit comme la différence entre le prix de marché des biens et services produits et le prix des achats nécessaires pour la production de ces biens ou services, toutes taxes comprises dans les deux cas de figure, mais en déduisant les subventions versées. Il est bien sûr possible de faire des sous-totaux de cette valeur ajoutée par nature d'activité, et cela donne ce qui suit.



Part de chaque nature d'activité dans le PIB français en 2003.
Source [INSEE/comptes de la Nation](#), 2004

Question (à 100 euros) : que pouvons nous faire croître, dans ce total, sans augmenter la pression sur l'environnement, et les émissions de gaz à effet de serre ? Et bien sûr il faut faire augmenter le PIB "en volume", c'est-à-dire autrement qu'en augmentant les prix, sinon cela s'appelle de l'inflation et non de la croissance. La différence entre les deux est normalement simple : si les ménages dépensent plus pour acheter "la même chose qu'avant" plus cher, c'est de l'inflation, alors que si ils dépensent plus pour acheter plus de choses, ou des choses qui n'existaient pas avant, c'est de la croissance, cette croissance correspondant à une croissance de la production "en volume".

La différence entre l'inflation et la croissance est cependant parfois subtile : un nouveau modèle de voiture de 70 CV, avec les mêmes accessoires qu'avant, mais qui va 10km/h plus vite (ce qui est parfaitement inutile dans un pays où la vitesse est limitée à 130), et qui vaut 5% plus cher, c'est de l'inflation ou de la croissance ?

Bref, ici comme dans beaucoup de domaines, catégoriser les choses n'est pas nécessairement aussi trivial qu'il y paraît. Pour en revenir à notre question, qui est de savoir ce que l'on peut faire "croître" dans l'économie nationale sans faire croître les émissions de gaz à effet de serre (et plus généralement les nuisances environnementales), la réponse est là aussi loin d'être évidente :

➤ Est-ce que le poste "agriculture, sylviculture, pêche" (1er item du graphique ci-dessus) peut croître "en volume" (donc autrement qu'en montant les prix, sinon c'est de l'inflation !) sans inconvénients climatiques ? Au vu des inconvénients liés à l'agriculture existante (pesticides, eutrophisation, érosion des sols, déforestation, changement climatique, etc), augmenter la production agricole en quantité sans augmenter la pression sur l'environnement, [dont les émissions de gaz à effet de serre](#), n'est assurément pas un pari gagné d'avance ! Augmenter la pêche sans augmenter la pression sur l'environnement ne semble pas non plus trivial, et enfin augmenter le nombre d'arbres coupés (sylviculture) sans augmenter la pression sur l'environnement (dont les

émissions de gaz à effet de serre) pose également des problèmes passé un certain seuil (probablement non atteint en France, mais dépassé dans d'autres pays),

➤pouvons nous faire croître l'industrie agro-alimentaire sans inconvénients climatiques ? Avant même de parler d'environnement, si cette industrie produit "plus de choses", à population constante ou à peu près, cela signifie probablement que chaque français va consommer plus de nourriture (ou une nourriture plus chère, donc avec généralement des denrées plus intensives en énergie pour leur production : viande, produits exotiques). Bien qu'il ne s'agisse pas d'une incidente, est-ce possible d'avoir cette évolution sans inconvénients sanitaires, comme par exemple l'[augmentation de l'obésité](#) ? Pour en revenir à l'environnement, une telle augmentation de la production de l'industrie agro-alimentaire est-elle possible sans augmenter la production agricole en amont, cette dernière étant déjà une [source majeure de gaz à effet de serre](#) ? Comment augmenter la valeur de ce qui est vendu (par exemple en multipliant les portions individuelles, qui valent plus cher au kilo) sans augmenter les emballages, qui ne [contribuent pas vraiment à faire baisser les émissions](#) ?

➤pouvons nous faire croître l'industrie automobile sans inconvénients en matière d'émissions de gaz à effet de serre ? Si chaque génération de nouvelles voitures est plus petite, plus légère, moins puissante, tout en étant plus chère, et [qu'elle n'est pas vendue en plus d'exemplaires](#), nous pourrions penser que c'est possible, mais malheureusement, avec les conventions actuelles, l'INSEE n'appellera pas cela de la croissance, mais de l'inflation...

➤Comment faire croître indéfiniment (car non seulement quasiment personne n'envisage la décroissance volontaire aujourd'hui, mais quasiment personne ne l'envisage non plus "un jour", aussi lointain soit-il !) la valeur économique "en volume" du tourisme, de la construction, de l'industrie des biens d'équipement, etc, sans augmenter les émissions de gaz à effet de serre aujourd'hui, et plus généralement tout un chapelet d'inconvénients environnementaux divers ? Nous pouvons ainsi continuer toute la liste et nous demander, pour chaque branche de l'économie, si elle peut "croître" sans inconvénients majeurs, ou sans entraîner *de facto* la croissance d'un autre segment de l'économie dont elle dépend (comme l'agriculture pour l'industrie agro-alimentaire, et surtout comme les transports pour tout ce qui est produit ailleurs que là où c'est consommé, ou pour tous les services liés au tourisme...). Nous verrons que cela ne sera pas si fréquent... Même l'enseignement, dans la mesure où il vise à former des individus aptes à exercer une activité productive, dépend aujourd'hui de l'existence d'une production !

Ce que montre cette brève énumération, c'est que le "yaka" découpler la croissance de la consommation d'énergie et de la hausse des émissions de gaz à effet de serre n'est pas si simple, et de toute façon la "croissance" est, dans bien des cas, tributaire non seulement de la croissance de la consommation d'énergie fossile, mais aussi de la croissance de la consommation de tout un tas de denrées matérielles, et [cela ne peut bien évidemment pas durer éternellement](#). Paradoxalement, plus la croissance est forte, et moins longtemps elle durera, et cela ne concerne pas que les gaz à effet de serre.

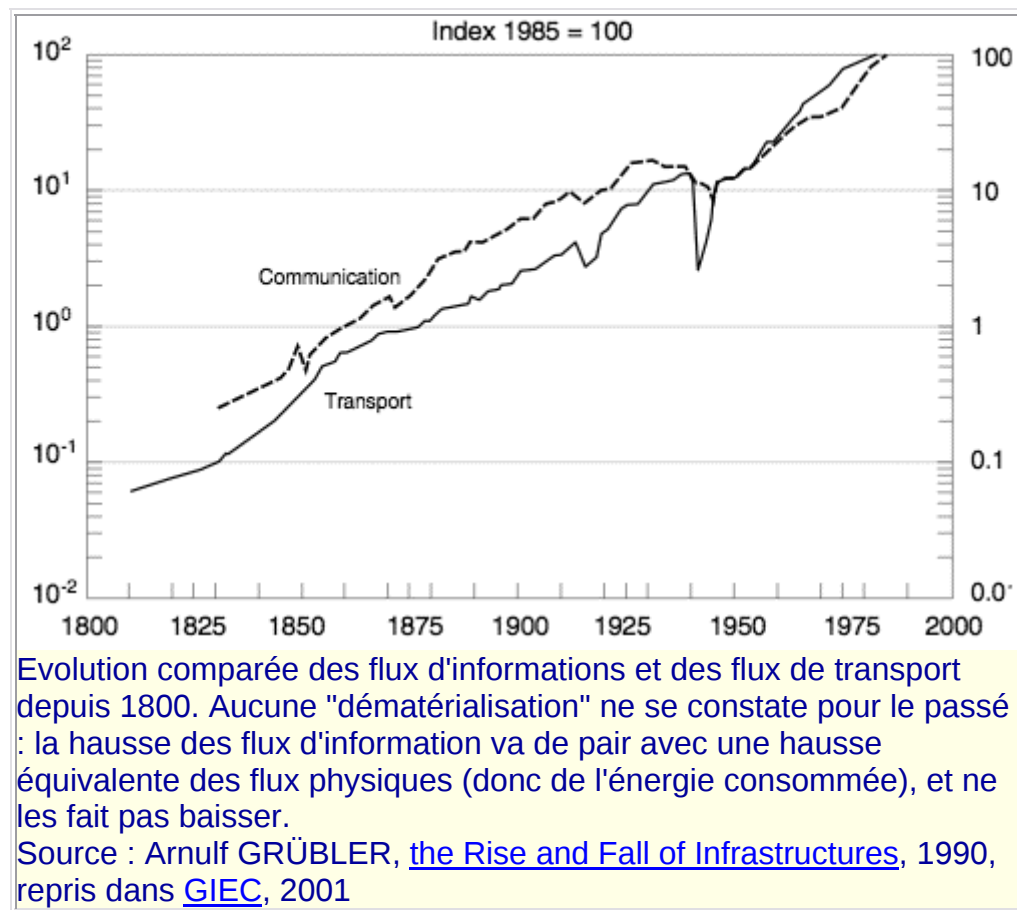
Que peut-on espérer de la "dématérialisation de l'économie" ?

Il est assez fréquent d'entendre, cependant, que la "dématérialisation de l'économie" va finir par produire l'effet désiré, à savoir une "croissance économique" qui n'ira plus de pair avec la croissance des émissions, et que l'on peut sérieusement compter sur cette évolution pour contribuer à nous tirer d'affaire.

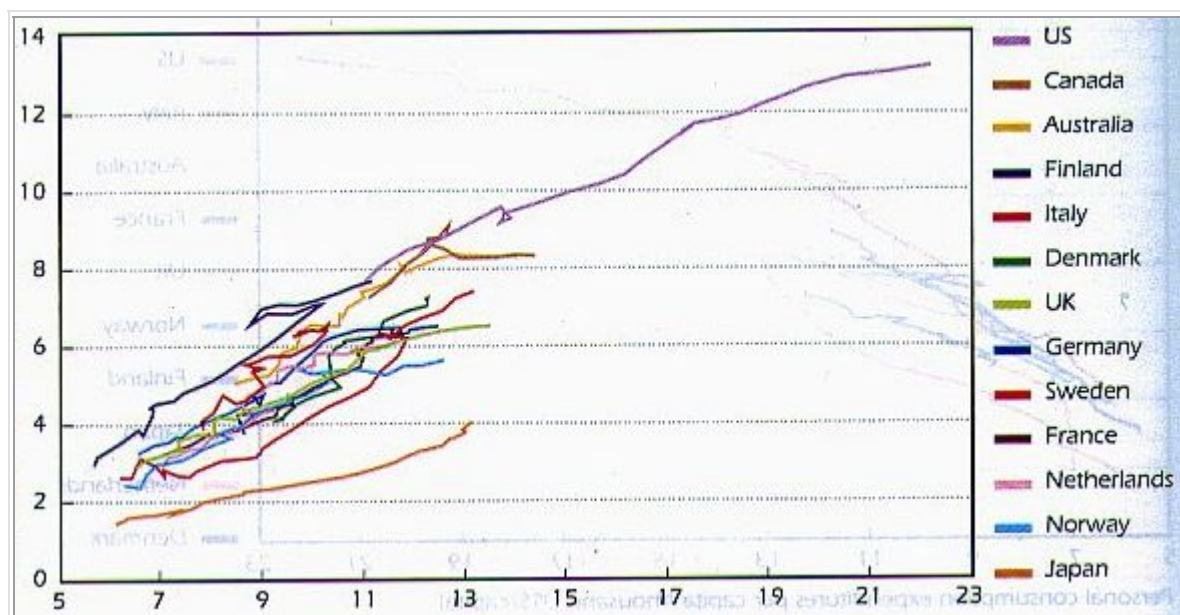
Avant de dissenter sur la chose, il reste à se mettre d'accord sur ce que l'on appelle la "dématérialisation". Elle est souvent considérée comme le fait que la part de l'emploi ou de l'activité qui va dans le tertiaire, ou dans le traitement de l'information, croît plus vite que l'économie elle-même, et que cela suffira à faire baisser les émissions de gaz à effet de serre, parce que les activités tertiaires sont moins intensives en énergie que les activités manufacturières. Malheureusement, cette croyance se heurte à quelques faits qui plaident en sens contraire :

- un employé du tertiaire continue à consommer de l'énergie : il faut le chauffer, et il se déplace (en voiture, souvent, en avion, parfois !). En moyenne, un employé du tertiaire consomme 1,5 tonne équivalent pétrole par an au titre de son travail (source IFEN, 2004), soit plus d'un tiers de la consommation moyenne d'énergie par Français, et à peu près autant que ce chaque Français consommait comme énergie en tout en 1960.
- en particulier, un employé du tertiaire moderne consomme beaucoup plus d'énergie qu'un agriculteur de 1945 (à cette époque 35% de la population active était aux champs) ou qu'un ouvrier textile de cette époque.

➤ Depuis plus d'un siècle, les flux d'information ne remplacent pas les flux physiques de marchandises : au contraire, les deux évoluent en parallèle, et lorsque la quantité d'informations qui circule augmente, les transports physiques augmentent aussi !



➤ Au niveau des personnes, partout dans le monde la croissance économique s'accompagne d'une hausse du kilométrage parcourus en voiture



Pour les 11 pays de l'AIE, évolution, de 1970 à 2000, du kilométrage annuel en voiture (axe vertical, en milliers de véhicule.km par personne) en fonction du PIB par tête (axe horizontal). La sanction est claire : plus le PIB par tête augmente, et plus on fait de km en voiture, ou, dit autrement, jusqu'à maintenant, et quel que soit le pays du monde, il a été impossible de faire de la croissance économique sans augmenter les km en voiture. Or ces derniers, qui appartiennent au monde physique, ne peuvent augmenter indéfiniment. Que va-t-il se passer, alors, quand ils baisseront, par exemple par manque de carburants à bon marché ?

On notera quand même que la "pente" de chaque courbe n'est pas exactement la même, ni le niveau de départ : entre le Japon, pays qui fait le moins de voiture par point de PIB, et... le Danemark, qui en fait le plus (autant pour la réputation écolo de ce pays !), il y a un facteur 3 : à pouvoir d'achat identique, un Japonais fait trois fois moins de km en voiture qu'un Danois.

Source 30 Years of Energy Use in IEA Countries, IEA, 2004.

➤une large part du produit de l'activité tertiaire vise à augmenter l'activité manufacturière : les sociétés de service en informatique, de conseil, d'expertise comptable, les loueurs de bureaux ou de voitures, ou encore les établissements d'enseignement sont conçus pour permettre un accroissement de la production manufacturière ou agricole, outre qu'ils consomment de l'énergie en direct.

En cherchant à avoir une vue synthétique sur la question, on réalise qu'il n'existe pas de raison de fond pour que la "dématérialisation" conduise à une baisse des émissions "toutes choses égales par ailleurs". On peut en effet écrire la petite équation simple ci-dessous (pour une décomposition pas à pas voir la première partie de la page sur l'[équation de Kaya](#)).

$$GES = \frac{GES}{\text{énergie}} * \frac{\text{énergie}}{PIB} * \frac{PIB}{POPactive} * POPactive$$

Cette équation peut encore s'écrire

Emissions de gaz à effet de serre	=	Contenu en gaz à effet de serre de l'énergie	*	Intensité énergétique de l'économie	*	Production par salarié	*	Population active
---	---	--	---	---	---	---------------------------	---	----------------------

Or la "dématérialisation" désigne souvent, pour certains économistes, une décroissance du terme "intensité énergétique de l'économie". Cela revient à dire que pour produire une même unité de PIB on utilise moins d'énergie. Mais dans le même temps on cherche généralement à avoir une augmentation de la productivité (donc une augmentation du terme "production par salarié"), et une augmentation de la population active (pour diminuer le taux de chômage et payer les retraites !), de telle sorte que le résultat d'ensemble n'a pas de raison particulière de conduire à une baisse des émissions (qui d'ailleurs ne se produit pas volontairement).

Le seul cas de figure où, en France, une baisse significative des émissions a été obtenue en même temps qu'une croissance économique, a été au moment de la montée en puissance du programme électronucléaire, qui a abouti à un gain très significatif sur le "Contenu en gaz à effet de serre de l'énergie" qui a plus que compensé l'évolution globale de l'ensemble des autres facteurs.

L'économie occidentale est-elle généralisable au monde entier ?

Si je me fie à ce qui figure le plus souvent dans les journaux, et bien que ce qui précède montre bien que cela ne "tiendra pas dans la boîte", notre schéma de pensée dominant, aujourd'hui, est qu'il est souhaitable de généraliser à la population la plus large possible le mode de vie des européens. Qu'est-ce que cela signifie ? Tout simplement que nous considérons comme un objectif souhaitable que chaque habitant de la planète dispose des biens suivants :

- plus de 30 m² de surface habitable chauffée - ou climatisée,
- une voiture par adulte en âge de conduire ou à peu près (le parc auto en France est de plus de 30 millions de véhicules - utilitaires compris - et en prolongation tendancielle il y aurait entre 2 et 3 milliards de voitures sur Terre en 2050, comparé à 800 millions aujourd'hui),
- 100 kg de viande par personne et par an (l'agriculture est en France la [première source de gaz à effet de serre](#)),
- 8.000 kWh d'électricité par personne et par an (c'est ce que nous consommons en France, une partie directement par le biais de nos factures d'électricité, et une partie indirectement car elle est "incluse" dans les produits manufacturés que nous achetons), or la production d'électricité est la première source de CO₂ dans le monde, car le gaz, le charbon et le pétrole représentent 2/3 de l'énergie primaire utilisée,
- des produits manufacturés (chemises, téléphones, perceuses, moquettes, lampes, surgelés Picard, bref tout ce que vous pouvez apercevoir autour de vous) en abondance et pas chers.

Un Européen émet en moyenne 3 tonnes [équivalent carbone](#) par an pour accéder à cette abondance matérielle. Appliquer cela à la population mondiale conduirait à :

➤ tripler les émissions de CO₂, qui passeraient de 6 à 18 milliards de tonnes [équivalent carbone](#) (notées Gtec, G voulant dire Giga) par an à population constante (les [scénarios les plus pessimistes du GIEC en 2001](#) vont jusqu'à 35 Gt par an en 2100),

➤ les multiplier par 5 si dans le même temps la population passait à 10 milliards d'individus (les émissions de CO₂ seraient alors de 30 Gtec/an). Notons que si l'objectif de société n'est pas d'imiter les Européens mais les Américains, et que nous avons 10 milliards d'individus, les émissions mondiales passeraient alors à 10 fois ce qu'elles sont actuellement (soit 60 Gtec par an, cela est une chose que même le [GIEC](#) n'a pas imaginée !). Il est vrai que cela commence à être beaucoup en regard des [ressources fossiles connues](#)....

Le changement climatique : peut-on justifier de ne pas agir "au nom de l'économie" ?

septembre 2000 - révisé novembre 2006

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

En septembre 2000 (le 23 pour être précis), un article du [Monde](#) présentait les externalités du transport routier liées aux émissions de CO₂ (une externalité est un coût qui n'est pas directement payé par l'utilisateur ou le client. Par exemple les accidents de la circulation, qui ont un coût qui n'est que très partiellement payé par les conducteurs à travers les assurances, le reste étant payé par les cotisations sociales ou les contribuables, constituent une externalité de l'utilisation de l'automobile).

Est-ce que cela a un sens de chiffrer l'externalité due à l'[effet de serre](#) ?

En effet, il faut bien distinguer deux choses que l'on mélange pourtant très souvent : le coût d'évitement d'un dommage, et le coût de réparation dudit dommage. Ainsi, l'article du Monde mentionné ci-dessus agrège dans les externalités un coût de réparation des infrastructures avec un "coût d'effet de serre", sans autre précision.

Un lecteur profane aurait tendance à penser que cela signifie qu'il faudrait faire payer cette somme - modeste en l'occurrence - aux camions et voitures pour se constituer une épargne servant, le jour venu, à réparer les dégâts du changement climatique, comme on répare les routes. On est donc tenté de considérer qu'il s'agit d'un coût de dommage, ce qui sous-entend que les dommages du changement climatique peuvent se voir attribuer une contrepartie monétaire.

Or estimer un coût de dommage objectif pour l'effet de serre est tout simplement impossible, car l'espérance mathématique de ce dernier est infinie.

Peut-être, avant d'aller plus loin, faut-il rappeler ce qu'est l'espérance mathématique. Elle correspond à la notion intuitive de ce que l'on peut attendre lorsque l'on sait ce qui se passe "en moyenne" quand on répète un acte un grand nombre de fois. Quand "en moyenne" je mets 15 minutes pour aller d'un endroit à un autre, je peux m'attendre à mettre un temps voisin la prochaine fois que je ferai le même déplacement, et donc "l'espérance mathématique" du temps pour ce déplacement est de 15 minutes : c'est le temps le plus probable que je mettrai à faire le déplacement à l'avenir compte tenu de ce que j'ai mis dans le passé.

L'espérance mathématique est donc la "moyenne" de toutes les valeurs possibles d'un événement futur (et c'est toujours la valeur moyenne que nous nous attendons à trouver). Elle vaut par définition

Somme, pour tous les événements possibles, de (valeurs de l'événement possible $\times$ probabilité de l'événement possible)

On voit immédiatement sur cette formule que si l'un des termes a une valeur infinie avec une probabilité non nulle, la somme est infinie.

Toutes les gestions de risques sont basées sur les espérances mathématiques. Par exemple, une prime d'assurance n'est rien d'autre que l'espérance mathématique du dommage assuré (plus les frais de gestion et les profits de la compagnie d'assurance !). Plus généralement, nous disons qu'un comportement est risqué quand l'espérance mathématique du coût des conséquences est élevée, ce qui est le cas quand il existe, dans la liste des comportements possibles, un événement correspondant à une perte importante avec une probabilité significative. La conduite en état d'ivresse est considérée comme étant à risque parce que l'une des possibilités (sa probabilité est significative) est la mort du conducteur (dont la valeur économique est élevée) et cela tire vers le haut l'ensemble de l'espérance mathématique de la conduite en état d'ivresse.

Si nous poussons le raisonnement jusqu'au bout, imaginons qu'un processus puisse engendrer (probabilité > 0) un dommage irréversible pour quelque chose d'indispensable à notre survie. Nous pouvons estimer que le dommage correspondant est infini, puisqu'il n'est réparable à aucun coût et entraîne notre mort. En conséquence, l'espérance mathématique du coût de réparation du dommage est infinie aussi, et quel que soit le moment dans le futur où cet événement interviendra (donc le taux d'actualisation associé à un tel dommage futur), son coût reste infini et n'est donc pas internalisable (sauf à rendre le prix du bien dans lequel il est internalisé infini).

Pour en revenir au changement climatique, pour justifier par des arguments économiques qu'il est "rentable" ou "pas rentable" de lutter contre, il faut donc pouvoir attribuer un coût à un certain nombre de dommages possibles, ainsi qu'une probabilité de survenance à chaque dommage, pour voir si l'espérance mathématique du coût de dommage est supérieure ou pas au "coût de l'action".

En outre, l'action est pour tout de suite, alors que les dommages sont surtout pour "plus tard" ; il faut donc leur attribuer une valeur dite "actualisée", c'est-à-dire avec une décote liée au fait qu'ils sont futurs. Mais pour faire ce calcul, nous allons nous heurter à un problème de taille ! En effet, quelle valeur attribuer, en 2004, des événements suivants, tous possibles dans le cadre du réchauffement en cours :

- la mort de 30% de l'humanité par maladies tropicales d'ici à 2089 ?
- Un arrêt du Gulf Stream en 2120 ?
- 10 mètres d'eau en plus pour l'océan mondial en 2350 ?
- La désertification de la moitié du globe en 2080 ?
- Une divergence du processus par déstockage du carbone après 2055, et la mort de 99% des hommes en 2200 ?

Bien évidemment, aucun modèle économique n'est capable d'attribuer une valeur financière à de tels événements, ni même de leur attribuer une borne supérieure : tout dépend des hypothèses ! On peut donc dire que le "coût" de ces éventualités, si elles survenaient (surtout la dernière !), est infini, puisque personne ne peut leur attribuer de borne supérieure. Personne ne peut non

plus dire aujourd'hui que les éventualités ci-dessus sont totalement impossibles, donc que leur probabilité de survenance est nulle.

En conséquence du fait que l'une des possibilités a un coût de réparation infini (ce qui signifie qu'il n'est pas réparable, cf. plus haut), l'espérance mathématique du coût de réparation est infinie aussi, quelle que soit la probabilité de survenance de l'événement (dès lors qu'il est possible) et même quel que soit le taux d'actualisation associé à un tel dommage. De ce fait, il n'est pas possible de dire, aujourd'hui, qu'il est 'économiquement non fondé' de lutter contre le changement climatique.

Pour ceux que la comptabilité ne rebute pas : rions un peu

Toute comptabilité se doit d'être prudente. Supposons que le législateur (ou même simplement le juge, puisque le principe de prudence de la comptabilité est déjà contenu dans le Code de Commerce), dans sa grande sagesse, oblige toute entreprise qui utilise des combustibles fossiles - c'est-à-dire [toute entreprise](#), de fait, puisqu'il suffit d'avoir des locaux chauffés pour émettre des gaz à effet de serre - à passer dans ses comptes une "provision pour remise en état du climat", à due concurrence de ses émissions cumulées de gaz à effet de serre (ce qui aurait un sens, puisque cette entreprise contribue à dégrader le climat, à due concurrence de ses émissions cumulées de gaz à effet de serre).

Cela revient, d'une certaine manière, à attribuer à cette entreprise sa quote part des dégâts futurs, la valorisation monétaire de ces derniers ne faisant l'objet d'aucune actualisation. Comme il n'y a pas de limite monétaire au montant des dégâts futurs, il n'y en a pas non plus pour la quote part revenant à l'entreprise, et donc un tel principe conduirait à rendre n'importe quelle entreprise déficitaire.

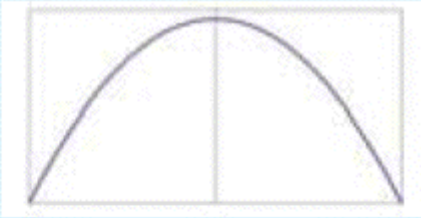
Et pourtant, sur le plan conceptuel, est-ce qu'une telle règle serait si absurde ?

Par contre il y a pour le changement climatique un coût d'évitement, ou encore de dissuasion, un peu comme pour le tabac : il ne s'agit pas tant de faire rentrer de l'argent dans les caisses que de dissuader un acteur économiquement rationnel d'émettre beaucoup de gaz à effet de serre (pour le moment ce n'est pas le cas).

C'est sur ce principe qu'est basé la [taxe carbone](#). Toutefois, si taxe il y a, son niveau sera probablement plus dicté par les résultats d'âpres négociations que par une quantification de l'effet comportemental attendu, comme c'est souvent le cas.

Et si on veut vraiment compter, ca donne quoi ?

En novembre 2006, l'ancien économiste en chef de la Banque Mondiale, Sir Nicholas Stern, s'est néanmoins livré à une analyse de type "évaluation économique des dégâts". Il a donc pris les simulations climatiques régionales, qui sont ensuite utilisées pour alimenter des simulations agronomiques, a rajouté par dessus des hypothèses économiques sur les dommages (il a supposé, par exemple, que les dommages causés par le vent croissait comme le cube de la vitesse, ou que la production agricole suivait une courbe en cloche en fonction de la température, etc), puis il a mis des hypothèses économiques là-dessus et en est sorti avec un chiffre : si nous ne faisons rien contre le changement climatique, il nous coûtera plusieurs points à plusieurs dizaines de points de PIB en 2050 par rapport à une croissance "normale".

Agricultural production [Section 3.3]	Inverse parabolic ("hill function") $y = -x^2$		
Heat-related human mortality [Section 3.4]	U-shaped		
Storm damage [Section 3.6]	Cubic $y = x^3$		
Exemples d'hypothèses prises dans le rapport Stern en entrée des calculs. Il s'agit clairement d'approximations, même si elles peuvent être considérées comme acceptables pour l'exploitation qui en sera faite.			

L'objet ici ne sera pas de discuter les hypothèses - et donc le résultat : vous seriez profondément endormi (et moi aussi probablement) avant que je n'arrive au bout. Il est plutôt de commenter quelques citations trouvées dans le résumé de ce rapport, parce qu'elles me semblent très bien traduire, en langage économique, des évidences "physiques" de ce dossier, et qu'elles restent valables quel que soit le niveau des dommages. J'ai assorti ces déclarations - dont je rappelle à nouveau au lecteur qu'elles sont "signées" par un individu qui a été un des plus grands argentiers de la planète - de quelques commentaires personnels.

Citation : "Climate change presents a unique challenge for economics : it is the greatest and widest-ranging market failure ever seen."

Traduction proposée : Le changement climatique offre un défi unique pour l'économie : c'est le dysfonctionnement du marché le plus grand et le plus étendu que nous ayons jamais vu."

Commentaire jancovicien : Voilà ce que donne (sans surprise pour votre serviteur) l'économie orthodoxe quand l'économiste prend la peine de se documenter sur les processus physiques qu'il commente. Question : avant de propager des inepties, les [Lomborg](#) et autres [Fourçans](#) ont-ils seulement pris la peine de savoir de quoi ils parlaient autrement qu'en lisant le journal ?

Citation : "The evidence gathered by the Review leads to a simple conclusion : the benefits of strong, early action considerably outweigh the costs."

Traduction proposée : Les éléments rassemblés par les auteurs amènent à une conclusion simple : les bénéfices d'une action résolue et immédiate sont considérablement supérieurs aux coûts".

Commentaire jancovicien : avec une telle affirmation, où est la défense des modestes ? Dans l'effort immédiat, qui certes va leur coûter, ou dans le laisser faire, qui va leur coûter bien plus quand il faudra passer à la caisse, eux compris ?

Citation : "The [economic] analysis should not focus only on narrow measures of income like GDP".

Traduction proposée : "L'analyse ne doit pas se centrer uniquement sur des indicateurs étroits de revenu comme le PIB"

Commentaire jancovicien : Ca ne vous rappelle pas un [certain ouvrage](#) ?

Citation : "CO₂ emissions per head have been strongly correlated with GDP per head."

Traduction proposée : "les émissions de CO₂ par habitant ont été fortement corrélées au PIB par habitant"

Commentaire jancovicien : sans stratégie de rupture, le "business as usual" [continue donc à augmenter les émissions](#).... tant que ça passe, et [ça cesse de passer bien avant que la Chine n'atteigne seulement le niveau de consommation d'un Polonais](#). Vouloir le bonheur des peuples à long terme et encourager autoroutes, aéroports, et grandes surfaces est donc paradoxalement antinomique. Amusant, non ?

Citation : "Stabilisation of greenhouse gases at levels of 500-550ppm CO₂-e will cost, on average, around 1% of annual global GDP by 2050. This is significant, but is fully consistent with continued growth and development, in contrast with unabated climate change, which will eventually pose significant threats to growth."

Traduction : "la stabilisation des gaz à effet de serre à 500-550ppm de CO2-equivalent nous coûtera, en moyenne, 1% du PIB en 2050. C'est significatif, mais toujours compatible avec la croissance et le développement, par opposition à un changement climatique non maîtrisé, qui va au final constituer une menace sérieuse pour la croissance".

Commentaire jancovicien : la prolongation tendancielle, si on ne fait rien, ce n'est pas la croissance non contrainte, c'est la décroissance subie. Que disait le Club de Rome en 1970 ? [Exactement la même chose](#), avec exactement les mêmes échéances...

Citation : "Uncertainty is an argument for a more, not less, demanding goal, because of the size of the adverse climate-change impacts in the worst-case scenarios."

Traduction : "L'incertitude est un argument en faveur d'un objectif plus ambitieux, et non moins ambitieux, à cause de l'ampleur des impacts dans le pire des scénarios"

Commentaire jancovicien : dire "je n'agis pas parce que je suis pas sûr de ce qui va se passer" est donc un argument économique non recevable (incidemment c'est facile de s'en rendre compte : si vous n'êtes pas sûr que votre enfant se fera renverser s'il traverse la rue les yeux bandés, est-ce une raison pour le laisser faire ?).

Citation : "Establishing a carbon price, through tax, trading or regulation, is an essential foundation for climate-change policy."

Traduction : "donner un prix au carbone, via la taxe, un mécanisme de quotas, ou des régulations, est une fondation essentielle pour une politique contre le changement climatique".

Commentaire jancovicien : comme le même auteur a déjà exposé que lutter contre le changement climatique, c'est social (puisque le prix de la prévention est inférieur au prix des conséquences, prévenir est donc social), et que toute lutte passe par une taxe carbone ou équivalent (comme des quotas allant en baissant continûment), la taxe carbone, c'est social ! Il suffisait de le dire....

Citation : "In order to influence behaviour and investment decisions, investors and consumers must believe that the carbon price will be maintained into the future."

Traduction : "Pour influencer les décisions concernant le comportement et les investissements, les investisseurs et les consommateurs doivent croire que le prix du carbone sera constant à l'avenir".

Commentaire jancovicien : pas de taxe qui monte et descend à la petite semaine, en fonction de qui a crié le plus fort la semaine d'avant, quoi... mais une vision claire de l'avenir, avec une règle bien établie pour le long terme. Ça ne vous rappelle pas étrangement la [conclusion d'un certain livre](#) ?

Citation : "A shared global perspective on the urgency of the problem [is] essential to respond to the scale of the challenge."

Traduction : "un consensus sur l'urgence du problème (est) essentiel pour répondre à l'ampleur du défi".

Commentaire jancovicien : Voilà qui légitime tous les efforts pour que [les media parlent plus et mieux du problème](#), clairement.

Citation : "It is still possible to avoid the worst impacts of climate change; but it requires strong and urgent collective action."

Traduction : "il est toujours possible d'éviter les pires impacts du changement climatique, mais cela demande une action collective forte et urgente".

Commentaire jancovicien : no comment...

Petit glossaire : quel est le sens du mot "économie" ?

L'une des raisons pour lesquelles il continue à se dire que de lutter contre le changement climatique serait "mauvais pour l'économie", malgré ce qui précède, est que le mot "économie" est à géométrie tellement variable que cette phrase peut être vraie ou fausse selon le contexte et qui parle. En effet, "l'économie" peut désigner :

- le chiffre d'affaires de la société employant celui qui parle. "C'est mauvais pour l'économie" doit alors se comprendre comme "cela n'arrange pas les affaires de ma société", mais les mauvaises affaires des uns font parfois les bonnes affaires des autres,
- le résultat - ou le cours de bourse - de la société employant celui qui parle. "C'est mauvais pour l'économie" doit alors se comprendre comme "cela risque de faire baisser la valeur de l'action de ma société" (et pire encore : la valeur de mes stock-options" !), ce qui n'est déjà plus la même chose,
- le nombre d'emplois pour une entreprise donnée. "C'est mauvais pour l'économie" peut alors se comprendre comme "je vais fournir moins d'emplois", ou "moins d'emplois qualifiés", ou "je vais augmenter moins vite le nombre d'emplois", ou encore d'autres choses... (mais le cours de la bourse ou le résultat d'en pâtiront pas nécessairement !),

➤ n'importe laquelle de ces notions pour un secteur pris dans son ensemble. Par exemple quand un responsable de la fédération de la métallurgie dit "c'est mauvais pour l'économie", il vise probablement le chiffre d'affaires de la profession, ou ses effectifs, mais sommes nous sûrs qu'il pense AUSSI au chiffre d'affaires ou au niveau d'emploi des producteurs de pommes de terre ?

➤ l'activité productive d'un pays donné, que l'on reflète par le Produit Intérieur Brut (PIB). Il faut cependant savoir que le PIB est un indicateur de flux, non de patrimoine : il représente la somme des valeurs ajoutées des activités marchandes et non marchandes situées sur le territoire. A quelques ajustements près (variations de stock, solde des échanges avec l'étranger), le PIB correspond à ce que nous dépensons. Il mesure donc l'activité humaine du moment, mais en aucun cas un patrimoine ; dire que nous sommes plus riches quand le PIB augmente est donc un gros malentendu : est-ce que je deviens plus riche quand j'achète plus de bonbons (et donc que l'entreprise qui fabrique les bonbons voit sa valeur ajoutée augmenter) ?

En particulier, si nous cherchions à tenir une comptabilité patrimoniale des Etats, en agrégeant possessions "artificielles" (maisons, routes, logiciels, etc) et possessions "naturelles" (réservoirs de pétrole, forêts, terres arables, fleuves, système climatique local, etc), comme nous dégradons généralement les secondes pour augmenter les premières, conclure de manière irréfutable que nous augmentons notre richesse globale est impossible, puisque tout va dépendre des monétarisations respectives de ce que nous créons et de ce que nous détruisons (et une monétarisation est toujours réfutable). Il convient de rappeler que cette approche "bilancielle" peut sembler farfelue pour le monde dans son ensemble, mais que c'est celle qui est retenue pour les individus ou les sociétés, pour lesquels on conclut qu'il y a enrichissement si les actifs augmentent plus vite que les dettes.

➤ le niveau de consommation matérielle moyen de la population, qui, c'est l'ironie de la chose, sera alors souvent exprimé non en unités économiques, mais en unités physiques ! (nombre de voitures vendues, de m² de logements construits, etc). Et de fait, dans un monde qui ferait réellement de la lutte contre le changement climatique une priorité, tout ce qui s'exprime en unités physiques aura du mal à croître indéfiniment (en fait [tout ce qui est physique aura du mal à croître indéfiniment de toute façon](#), que cela nous plaise ou pas !). Mais il serait plus juste, alors, de dire que de lutter contre le changement climatique est mauvais pour la croissance de la consommation matérielle (ce qui est parfaitement vrai). Mais nous parlons alors d'un aspect bien particulier de l'économie, qui est la consommation exprimée en unités physiques, non de "l'économie" en général !

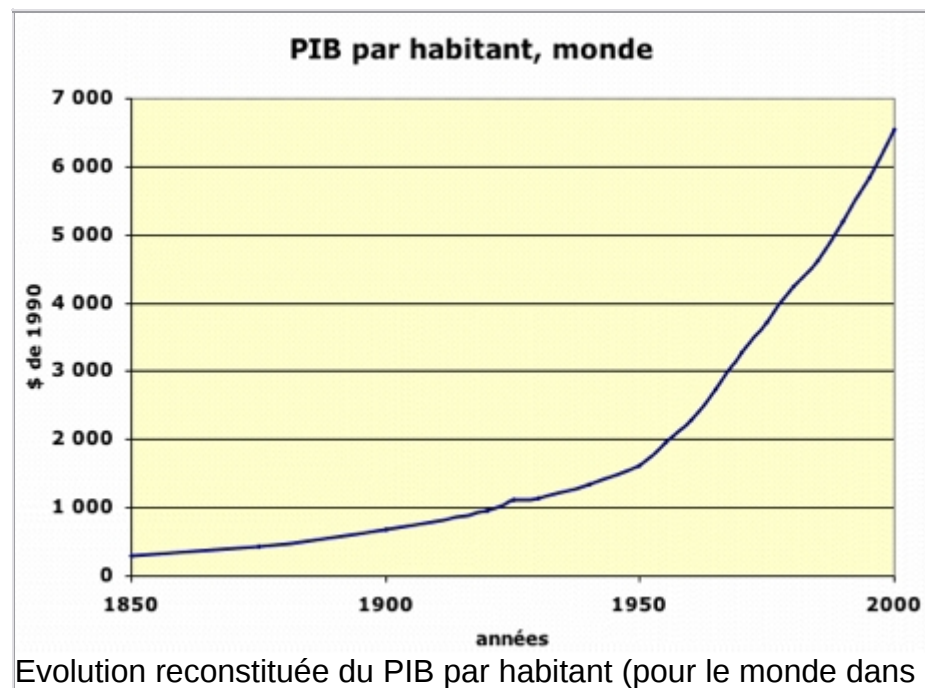
"L'économie" peut encore désigner le solde du commerce extérieur, la balance des paiements, le taux de croissance du PIB, ou l'évolution du taux de chômage.... Bref quand quelqu'un dit que de lutter contre le changement climatique est "mauvais pour l'économie", de qui et de quoi parle-t-il très exactement ???

Sommes nous déjà en décroissance ?

dernière version : décembre 2008

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Question stupide, votre honneur : évidemment que non, nous ne sommes pas en décroissance. Sauf à l'occasion d'épisodes aussi brefs qu'indésirables, la vocation de l'économie, c'est de croître, et en général nous croissons bel et bien, non mais sans blague !



son ensemble) depuis 1850.

Source : J. Bradford Delong, 2005

Que tout le monde affirme que la croissance est l'état normal de l'économie, c'est indéniable. Mais au fait, c'est quoi exactement la croissance ? En économie, cette "croissance" désigne généralement (malgré l'absence de complément de nom) quelque chose de bien précis : l'augmentation, d'une année sur l'autre, d'une grandeur qui s'appelle le Produit Intérieur Brut. Ce dernier a lui-même une définition très précise : il s'agit du "résultat final de l'activité de production des unités productrices résidentes". Ouf ! Si nous décortiquons pas à pas, et que nous traduisons cela en Français, cela donne ce qui suit :

➤ il s'agit du "résultat final" de l'économie, c'est-à-dire des biens et services qui sont utilisés par un *consommateur final*. Le consommateur final, dans cette affaire, c'est celui qui utilise le bien ou service pour son propre compte, et ne va pas l'incorporer dans une production vendue. Par exemple, si j'achète un poireau pour faire de la soupe que je vais manger moi-même, je suis un consommateur final pour ce poireau. Par contre, si j'achète le même poireau en tant que restaurateur (pour fabriquer puis vendre de la soupe aux poireaux) ou en tant qu'épicier (pour simplement le revendre après l'avoir transporté), alors je ne suis pas un consommateur final pour ce poireau. Ce "résultat final" (ou "biens et services disponibles pour un usage final", ce que l'on trouve aussi parfois) concerne donc tout ce que les agents économiques (individus, mais aussi entreprises, administrations, associations, etc) consomment en propre. Il peut s'agir de biens durables (immeubles, voitures) ou pas, et cela inclut les variations de stock.

➤ ce "résultat final" doit provenir d'une "activité de production". En fait, cette "activité de production" signifie le plus souvent "activité marchande", car c'est le seul cas de figure où la mesure du résultat est facile, à défaut d'être juste : on va valoriser la production... au prix de vente. Cela semble évident, mais en fait ça ne l'est pas du tout ! En effet, comment valoriser la production non vendue, en particulier tout ce que l'on appelle "services non marchands" ? Cela concerne une large part de l'éducation (l'Education Nationale n'envoie pas de facture quand votre gamin va à l'école), de la santé, de la justice, et plus généralement tout ce que des fonctionnaires font pour la collectivité sans se faire directement payer. Et encore, là nous avons un cas de figure facile, car même si le service est non marchand il y a eu échange monétaire : la collectivité a donné des sous au médecin ou à l'enseignant. Il arrive que les services soient rendus sans aucun échange monétaire (le troc), auquel cas la comptabilisation devient un peu plus difficile encore, et enfin il arrive qu'il y ait production mais pas d'échange du tout.

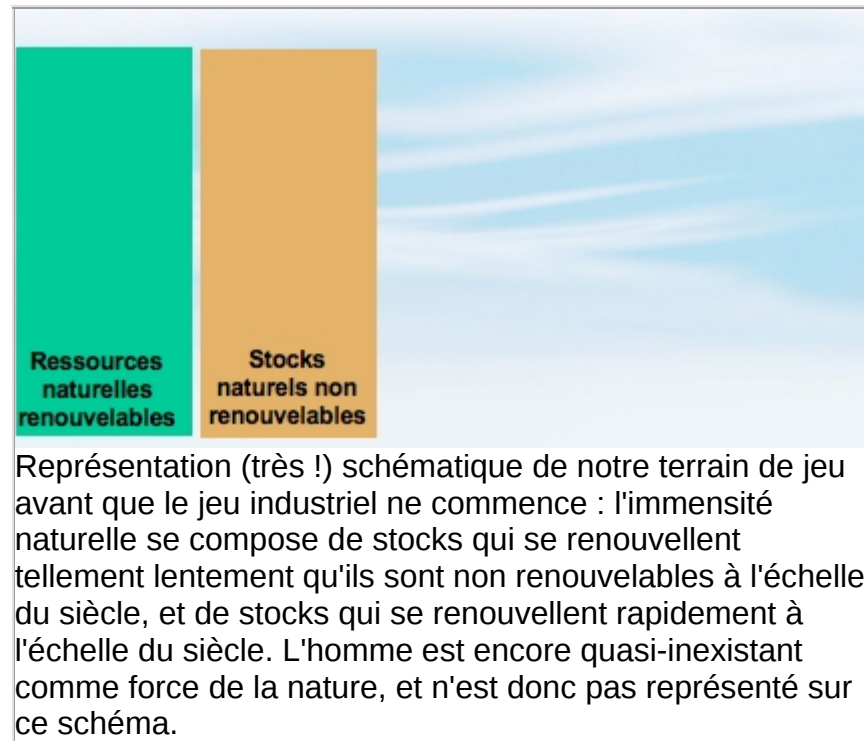
Ce dernier cas de figure concerne tout ce que le gens font pour eux-mêmes : les légumes de son propre potager (sauf si vous les vendez au marché), le ménage ou le bricolage que vous faites chez vous, le temps que vous consacrez à vos enfants, etc. Dans ce cas de figure, la production échappe généralement au PIB (quand il n'y a pas d'échange, en général on ne compte rien du tout). Et enfin ce qui apparaît "tout seul" n'existe pas dans le PIB : il faut la main de l'homme. Le poisson qui grandit tout seul dans la mer est inexistant dans le PIB jusqu'à ce qu'il soit pêché et donc vendu, alors que le poisson d'élevage apparaît dans les inventaires du pisciculteur et existe donc dans le PIB.

➤ Enfin les "unités productrices résidentes" signifie que la production doit être effectuée sur le territoire national, peu importe qui possède l'unité de production (le critère est géographique, non capitalistique). Le passage d'une usine sous contrôle étranger ne change donc rien au PIB.

Ah ! J'allais oublier : le PIB est annuel. Dit autrement, il comptabilise la valeur de la production de l'année.

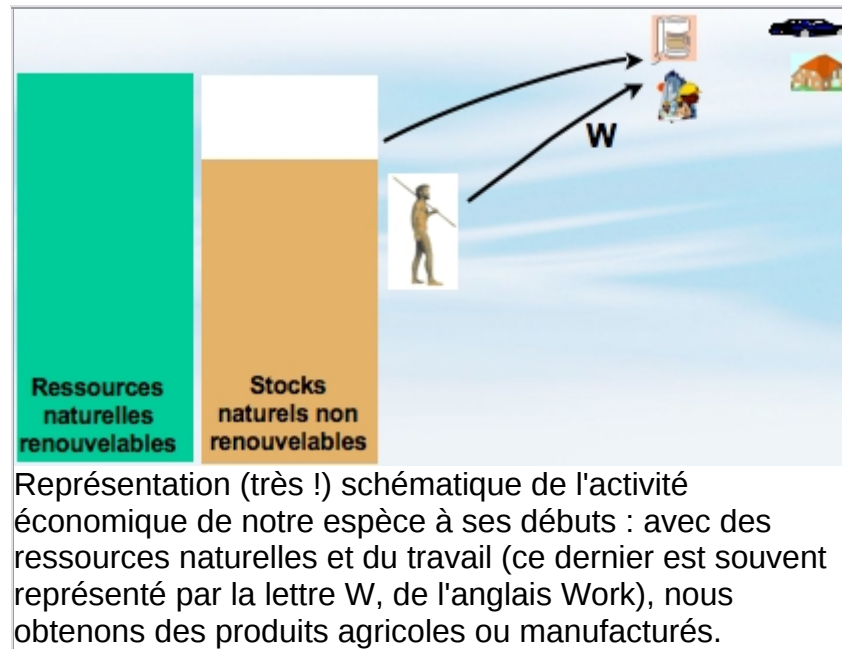
Comme cela a été indiqué plus haut, la production qui entre dans le PIB est justement celle qui n'est pas apparue "toute seule". A nouveau, la croissance des arbres ou la reproduction des poissons ne sont donc pas dans le PIB, sauf si... c'est une conséquence de l'action humaine et qu'il y a échange marchand derrière. On voit tout de suite que le même bien peut donc être ou non dans le PIB selon le cas de figure, et en fait on va voir que cette manière de compter, que nous avons placée au panthéon de nos indicateurs, est une convention parmi N possibles, et va probablement nous emmener droit aux ennuis dans pas longtemps parce qu'elle reflète de moins en moins bien les flux physiques du monde qui nous entoure. Pour s'en convaincre, nous allons faire un petit voyage dans le passé, avant l'apparition des hommes, ou du moins avant qu'ils existent en quantité telle que cela modifie significativement la surface du globe. Allez, disons que nous sommes il y a 10.000 ans, avant les débuts de l'agriculture.

A ce moment-là (graphique ci-dessous), nous évoluons dans un environnement planétaire qui, schématiquement, se compose de ressources non renouvelables à l'échelle du siècle (des sols, qui mettent 100.000 ans à se reconstituer à partir de la roche nue ; des hydrocarbures, [qui mettent 60 millions d'années à se reconstituer](#) à partir du plancton océanique ; des minerais divers, qui ne peuvent même pas se reconstituer une fois la planète formée ; un océan, qui n'est pas récupérable si il devient subitement impropre à la vie, etc) et de ressources qui se renouvellent rapidement à l'échelle du siècle (l'essentiel des végétaux, poissons, animaux, notamment).



Puis les hommes se mettent à exister en quantités significatives, leur technique progresse, et dans le sillage de tout cela on va trouver des activités "économiques" qui sont physiquement de plus en plus significatives. En effet, d'un point de vue physique, qu'il s'agisse de fabriquer un racloir en silex ou la fusée Ariane, ces activités économiques consistent toujours à faire la même chose : transformer des ressources "naturelles" en produits "artificiels" (graphique ci-dessous).

Tout ce qui fait l'objet d'échanges marchands démarre donc de la même manière : nous prenons des ressources naturelles (sols, photosynthèse, minerais, hydrocarbures, etc) et nous les "utilisons" pour en faire des produits, certains dits "naturels", même quand nous avons utilisé des auxiliaires artificiels (par exemple des pommes, même si elles sont récoltées avec un tracteur) et d'autres "artificiels" (par exemple une clé à molette).

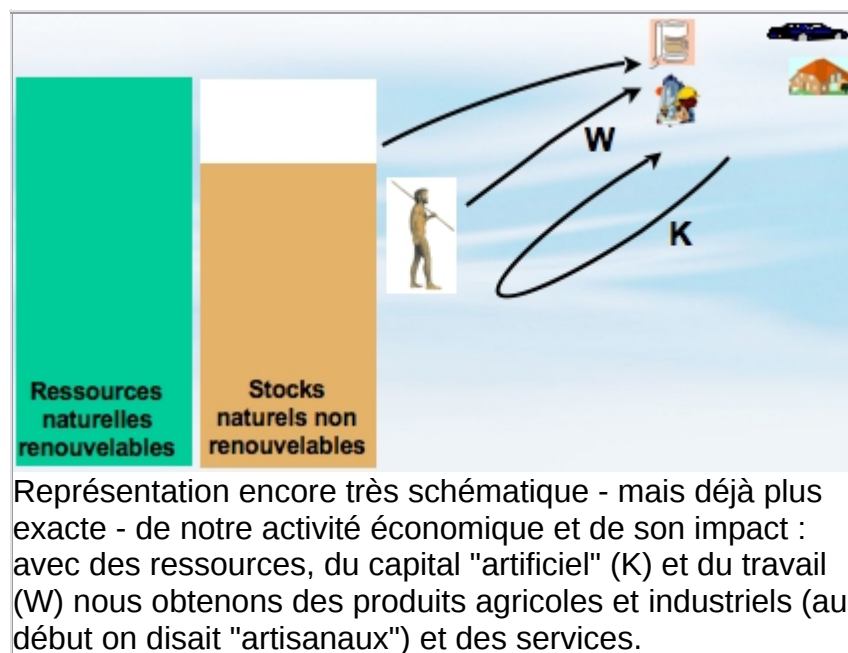


Le graphique ci-dessus, malgré son côté simpliste, rappelle deux caractéristiques très importantes de notre activité sur terre :

- dès la première minute où nous avons commencé à piocher dedans, les stocks non renouvelables (par exemple les minerais métalliques) ont commencé à diminuer. Pour le pétrole (et le gaz et le charbon), c'est [juste une convention funeste](#) qui nous a fait croire, avec les "40 ans de réserves en permanence", que ce liquide indissociable de notre "développement" se reconstituait sous terre au fur et à mesure que nous le consommions. S'il faut 60 millions d'années pour passer du plancton océanique à l'or noir, c'est évidemment complètement impossible de reconstituer les stocks en temps réel !
- par contre, tant que notre activité "économique" n'était pas trop importante, les stocks renouvelables se reconstituaient au moins aussi vite que nous les utilisons, et donc le niveau des stocks ne baissait pas.

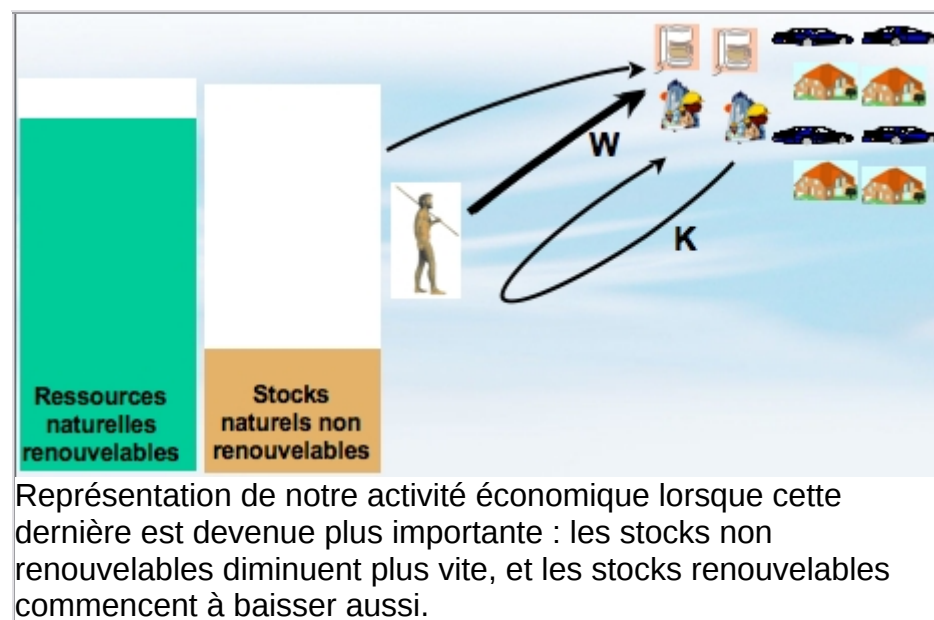
Même s'il rappelle déjà ces deux faits majeurs sur les stocks, le graphique ci-dessus omet cependant un terme habituel dans l'économie dite classique : le capital (traditionnellement représenté par la lettre K) . Le capital, ce n'est en fait rien d'autre que des biens ou des services qui ne disparaissent pas quand on s'en sert, ou du moins pas tout de suite : un immeuble, un ordinateur, un terrain, ou encore un brevet ou une marque. Mais physiquement, c'est même pareil qu'une brosse à dents ou une nappe : ces biens et services inclus dans la capital n'existeraient pas sans ressources naturelles ou sans travail humain.

Une vision complétée de notre système économique est alors représentée sur le graphique ci-dessous.



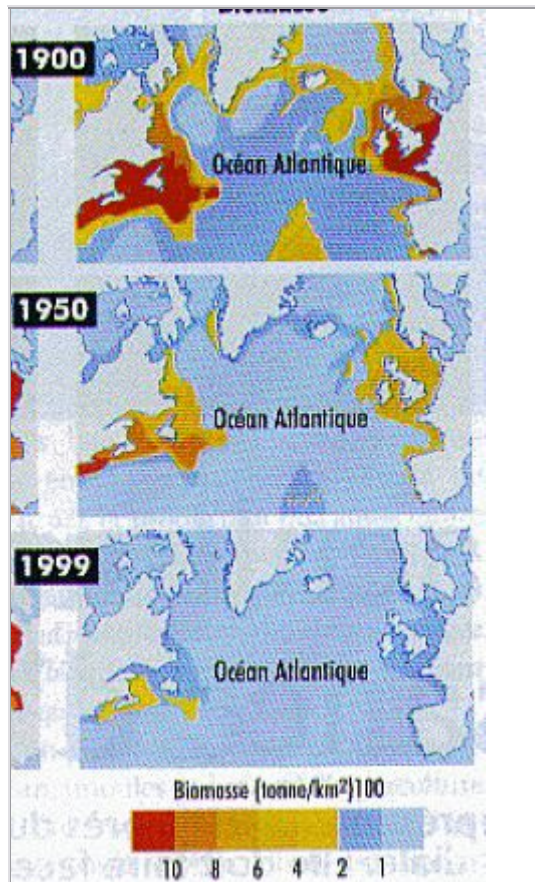
En clair, le capital est une boucle interne au système : on "réutilise" une production passée. Ainsi va donc notre économie, utilisant des ressources, renouvelables ou non renouvelables, et du travail humain présent ou passé (s'appelant alors du capital) pour produire des choses aussi essentielles que des machines à café et des choses plus futiles comme des logements, des trains et

des assiettes. Et lorsque notre économie "croît", le flux de produits augmente, et un jour... la production en question commence à entamer aussi les stocks renouvelables (ci-dessous).



Pour certains stocks auparavant renouvelables, cela a pu commencer il y a fort longtemps. C'est par exemple dès l'an mil que le stock forestier a commencé à diminuer significativement en Europe. La couverture forestière y est passée de 80% de la superficie européenne en l'an 1000 à 15% environ en l'an 1850. Ce mouvement de décroissance des stocks forestiers est toujours en cours aujourd'hui, essentiellement sous les tropiques.

Un autre stock auparavant renouvelé qui est actuellement en décroissance significative concerne les poissons, et cela a commencé dès l'an 1900 dans l'Atlantique Nord (ci-dessous). Le stock mondial de baleines avait même commencé à décliner significativement au 19^e siècle !

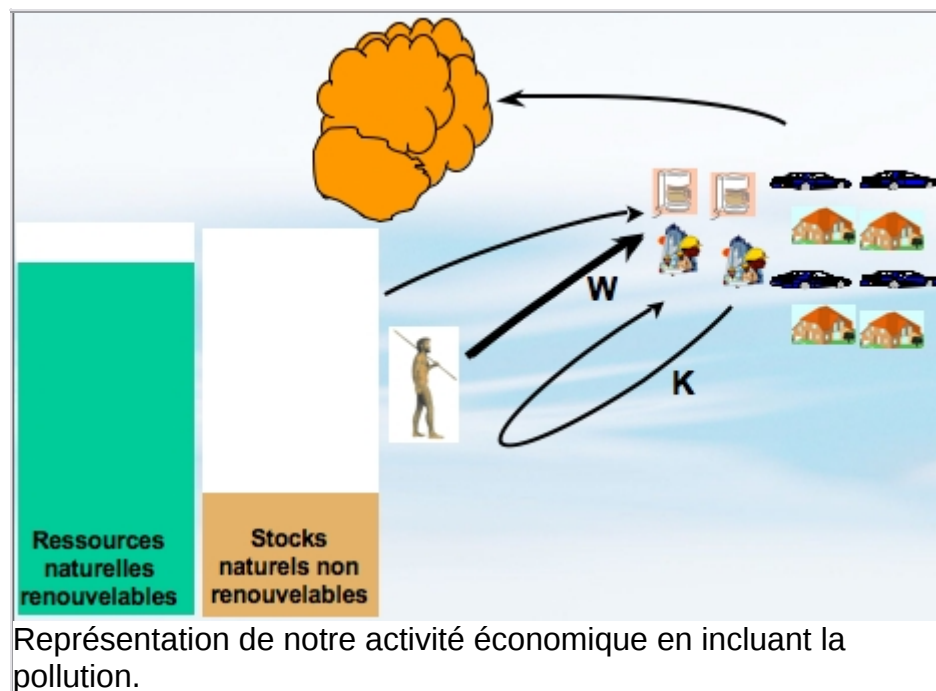


Evolution de la biomasse dans l'Atlantique Nord entre 1900 et 2000.

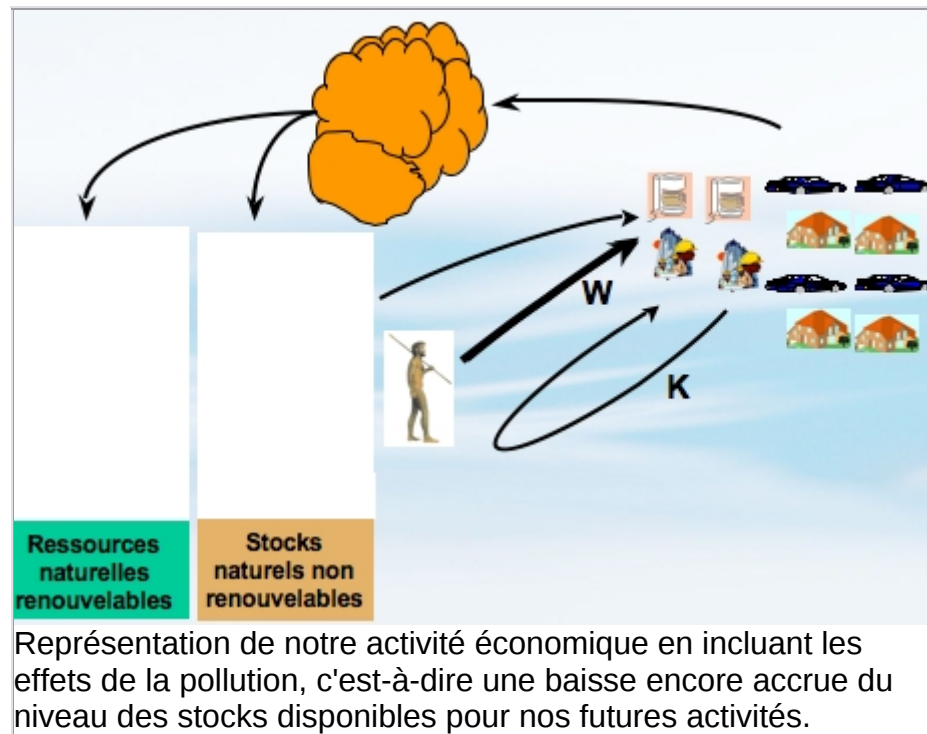
Source : La Recherche, juillet 2002

En bref, quand elle devient trop importante, notre activité de transformation ou de prédation se met à entamer les stocks, à la fois renouvelables et non renouvelables. Et puis notre activité a une autre conséquence, qui va croître avec les flux physiques

manipulés : elle crée ce que l'on appelle de la pollution. La pollution, ce n'est rien d'autre que la dissémination dans l'environnement de sous-produits indésirables de notre activité, qui a été représentée sur le graphique ci-dessous par un petit nuage... brun.



Un peu de pollution, tous les êtres vivants en produisent. Mais tout est affaire de proportions, et si elle devient suffisamment importante, va elle aussi entamer nos stocks. Par exemple, un surplus significatif de CO₂ dans l'air va engendrer une [acidification de l'océan](#), et nous pouvons considérer cela comme une "dégradation du stock" (de fait, nous n'avons qu'un seul océan, si celui que nous avons devient trop acide, on ne peut pas aller en chercher un autre au magasin). Dit autrement, ce que représente le graphique ci-dessous, c'est que notre activité économique actuelle, assurément significative à l'échelle de la planète, consiste à diminuer les stocks naturels, renouvelables ou non, pour augmenter les stocks "artificiels", en créant à cette occasion de la pollution qui va entamer un peu plus les stocks naturels.



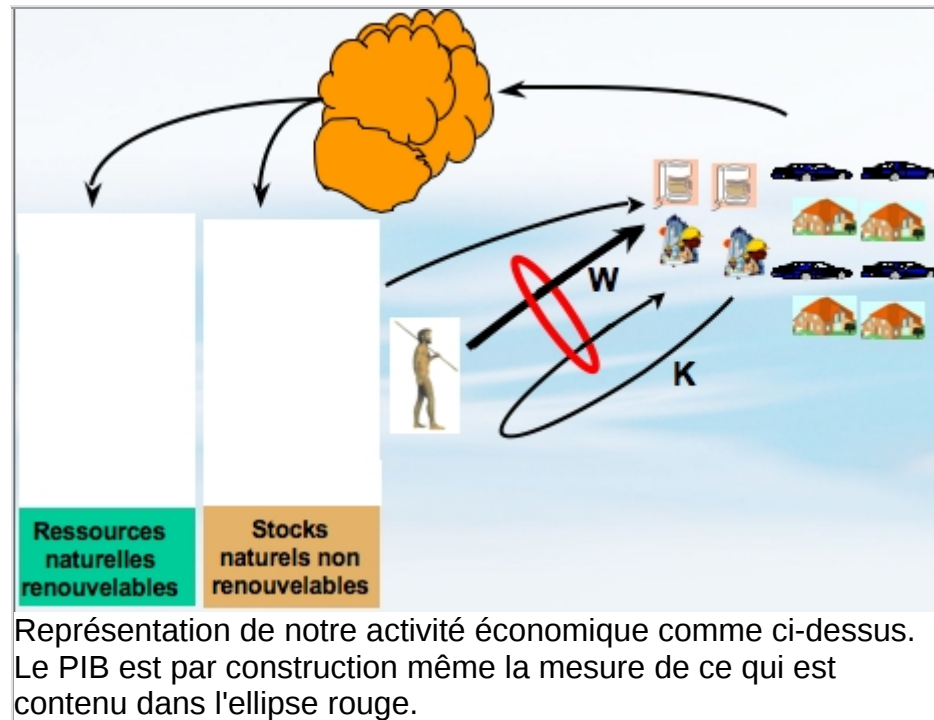
Mais... tout cela vaut-il aussi pour les services ? En effet, jusqu'à maintenant, nous avons considéré l'économie comme si elle ne fournissait que des produits, or il y a tout un pan de l'économie qui concerne les "services", parfaitement dématérialisés comme il se doit, et qui ni ne consomment de stocks naturels, ni ne créent de pollution. Heu... en sommes nous si sûrs ?

L'examen des flux physiques va hélas nous faire déchanter : il n'y a pas de services sans énergie ou sans matière. Pour commencer, une large partie des services (au sens de l'INSEE) sont de gros consommateurs d'énergie, puisqu'il s'agit soit de transports, soit d'activités immobilières. Or transport et bâtiments, mis bout à bout, c'est par exemple 70% de l'énergie consommée en France. Et si nous regardons les choses d'un peu près, l'essentiel des autres services ne peuvent exister... sans produits manufacturés "quelque par ailleurs". Rapide florilège :

- le commerce (un pan significatif des services) n'existe pas sans production d'objets à vendre (industrie ou agriculture parfaitement matérielles), sans transports et rarement sans bâtiments, l'un et l'autre étant consommateurs de ressources,
- les activités bancaires et financières (autre gros pan des services) n'existent pas sans industries à qui elles prêtent, sans construction (parfaitement matérielle) de logements ou de voitures pour prêter aux particuliers (les prêts immobiliers et auto sont à l'origine d'une fraction significative de l'activité bancaire), sans ordinateurs (la fabrication de l'informatique est une industrie parfaitement matérielle : métallurgie, chimie, métaux, électricité au charbon et au gaz, etc), sans services postaux (pleins de camions) ou de télécoms (qui sont matériels en diable : tranchées, câbles, équipement électroniques, maintenance, etc), et on pourrait continuer la liste un certain temps,
- l'enseignement n'existe pas sans beaucoup de temps disponible pour apprendre, donc [beaucoup d'esclaves mécaniques](#) pour travailler à notre place pendant que nous étudions (regardez où ont lieu les études longues : bien plus dans les pays qui consomment beaucoup d'énergie que dans les pays très sobres !), et sans activités productives pour le payer (car l'enseignement est payé avec des impôts qui sont eux-mêmes prélevés sur les activités productives),
- la garde d'enfants (un des premiers métiers en France en termes d'effectifs) n'existe que si... les parents sont incapables de garder leurs moutons parce qu'ils travaillent en dehors de leur domicile, donc dans une activité productive dépendante de ressources naturelles (et puis pour garder des enfants il faut un local, qui est matériel, des transports, qui sont matériels, etc),

Bref la liste ci-dessus pourrait être continuée un certain temps (et même un temps certain), pour montrer que les services sont bien les "associés" de l'industrie et de l'agriculture productive, et non leurs successeurs dématérialisés. L'opinion courante qui voudrait que les sociétés industrielles soient en train de se dématérialiser parce que la part des services augmente [est un mythe](#). L'examen des faits montre qu'il n'en est rien.

Mais revenons à nos moutons, c'est-à-dire au PIB évoqué au début de cette page. Car ce PIB, il correspond à quelque chose de bien précis dans notre approche "physique" de l'économie : il mesure la composante *purement humaine* de l'activité, qui est entourée par l'ellipse rouge dans le graphique ci-dessous.



En effet, comme la nature ne se fait pas payer mais les hommes si, on va retrouver dans le prix d'un produit ou service uniquement la part humaine (celle qui a été payée) et non la part "naturelle" (en gros les consommations de stocks naturels) qui n'a été payée à personne. Vous vous rappelez vos vieux (ou pas si vieux !) cours d'économie ? La production est une fonction du capital **humain** et du travail **humain** : $P = F(K, W)$. Ne cherchez pas les consommations de stocks naturels dans l'économie classique : elles n'y sont pas !

Et du reste, ceci expliquant cela (le fait qu'on ne paye que des hommes), le PIB est **aussi** égal à la rémunération totale des acteurs humains qui ont concouru à la production des biens et services "finaux". Par définition, le PIB est égal à l'empilement des salaires, des plus-values, des rentes et des rémunérations diverses des hommes et des "agents économiques", ce qui explique pourquoi on aime tant qu'il augmente. Mais là où nous commençons à prendre nos désirs pour des réalités, c'est quand nous pensons qu'un PIB en hausse signifie un enrichissement de la société.

Qu'est-ce qu'un enrichissement ? En général, c'est un accroissement de son patrimoine, et non de ses revenus: si je double mon salaire mais que mes charges triplent, j'augmente peut-être mon train de vie, mais mon patrimoine va diminuer. Mieux : si mes revenus augmentent, mais que mes charges augmentent systématiquement plus vite, il suffit d'attendre et je n'aurai plus de patrimoine, et je ferai faillite.

On voit donc que non seulement le patrimoine n'évolue pas nécessairement comme les revenus, mais surtout qu'il est le résultat d'un bilan : son évolution est la différence entre ce qui entre et ce qui sort. Or pour notre activité économique globale (le PIB), la convention a été de compter ce que nous créons **mais pas ce que nous consommons**. Le prix des "ressources naturelles" n'est rien de plus que la rémunération du travail et du capital humain nécessaires à leur extraction ou à leur mise à disposition. Dans cette affaire, on ne compte que des sommes en plus, et jamais rien en moins : le PIB est donc un chiffre d'affaires sans charges.

S'intéresser uniquement au PIB pour mesurer le bon état d'un pays (ou de l'humanité), c'est donc comme mesurer uniquement le chiffre d'affaires d'une entreprise (ou en fait, pour que le parallèle soit exact, à sa masse salariale), sans s'intéresser à son résultat (ou sans s'intéresser à son patrimoine, ce qui revient un peu au même). Si, malgré un chiffre d'affaires en croissance, notre entreprise est constamment déficitaire, elle finira par faire faillite, car son patrimoine finira par disparaître.

Il en va de même pour notre PIB : si ce dernier (qui est l'équivalent d'un chiffre d'affaires), malgré une hausse continue, engendre des charges futures - mais non comptabilisées - supérieures au produit de l'année considérée, nous ne sommes en croissance qu'en apparence. Or des charges, dans notre activité économique, il y en a bien :

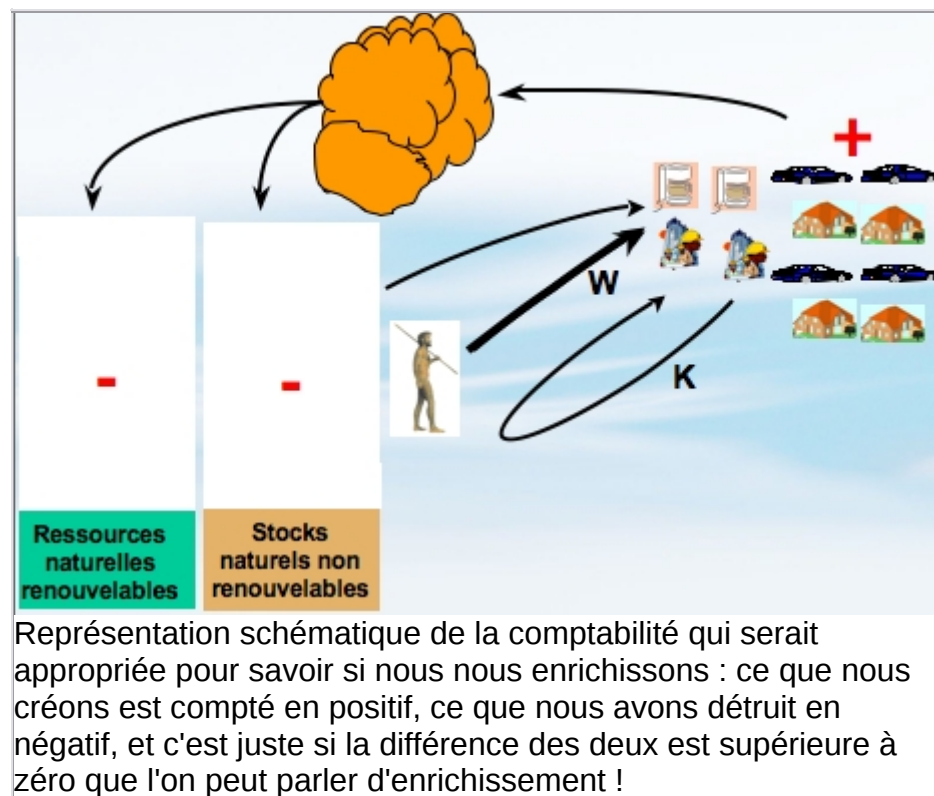
➤ les prélèvements de ressources non renouvelables, ou de ressources renouvelables au-delà du seuil de renouvellement, devraient donner lieu à une espèce de "dotation aux amortissements" (tous ceux qui sont un peu familiers de la comptabilité d'entreprise devraient comprendre !),

➤ les dommages futurs liés à la pollution devraient donner lieu à une forme de provision pour risque.

Une "bonne" comptabilité nationale, dans notre affaire, devrait, comme pour une entreprise :

➤ compter en positif les biens que nous avons créés,

➤ dans le même temps, compter en négatif les ressources que nous avons consommées (par exemple la diminution des stocks d'hydrocarbures), ou les stocks que nous dégraderons plus tard à cause de notre activité présente (ce qui est le cas pour le [changement climatique](#)) (graphique ci-dessous).



Cette représentation "physique" de notre activité permet aussi de comprendre pourquoi, **par construction**, le PIB ne permet pas de voir venir les ennuis très longtemps à l'avance. En effet, comme ce PIB mesure le flux qui va du stock naturel vers le stock "artificiel", plus il croît, plus vite le stock naturel diminue (sans que nous ne nous rendions compte de cette dernière donnée, puisque économiquement elle est inexistante). Lorsque le stock naturel sera devenu trop faible pour permettre au PIB de continuer à croître, nous serons alors beaucoup trop avancés dans la dégradation du système pour réagir à temps "sans casse". Ce

n'est pas en une semaine que nous allons casser puis reconstruire les infrastructures, les métiers, les schémas de pensée, les outils économiques, les organisations, etc !

Et l'une des conséquences de cette "casse" sera bien évidemment un effondrement économique, c'est-à-dire une baisse rapide du flux qui va des stocks (trop entamés) vers les productions "humaines", et qui est le seul que nous mesurons actuellement. En prolongation tendancielle, il suffit d'attendre et [le Club de Rome aura raison](#). Du reste, si nous comptons correctement, en déduisant "quelque chose" pour les consommations de ressources naturelles non renouvelées, sommes nous encore en croissance ?

Le produit intérieur brut de l'humanité s'est élevé en 2007 à environ 40 000 milliards d'euros. Pour permettre cette production de biens et services de toute nature nous avons :

➤ consommé (donc détruit) environ 3,9 milliards de tonnes de [pétrole](#), à peu près 2,4 milliards de tonnes équivalent pétrole de gaz, et 6,3 milliards de tonnes de charbon (source : BP Statistical Review),

➤ émis dans l'atmosphère environ 50 milliards de tonnes équivalent CO₂ de [gaz à effet de serre](#), dont une partie [va y rester des milliers d'années](#),

➤ utilisé (donc détruit) un milliard de tonnes de minerai de fer, et de quelques milliers de tonnes à quelques centaines de millions de tonnes pour les autres minerais (du cuivre à l'indium, en passant par à peu près tous les éléments du tableau de Mendeleïev),

➤ déforesté entre 10 et 15 millions d'hectares de forêts (sur une superficie mondiale qui fait à peu près 3,6 milliards d'hectares),

➤ et encore [artificialisé](#) quelques dizaines de milliers de km², supprimé des espèces vivantes, acidifié un peu l'océan, réduit certains stocks de poisson, diminué la banquise, rendu obèse un peu plus de monde, et la liste des "moins" vous aura endormi(e) avant qu'elle ne soit terminée.

Question : à partir de quelles valeurs pour tout cela est-ce que nous nous fourrons le doigt dans l'oeil jusqu'au plexus en pensant que nous nous enrichissons ? Car le véritable enrichissement n'est acquis que si la valeur marginale des biens que nous avons créés en 2007 (c'est-à-dire le PIB de l'année) est supérieure à la valeur marginale des stocks "naturels" que nous avons détruits

pour y parvenir. Si ce n'est pas le cas, nous nous sommes apauvris et non enrichis, malgré un chiffre d'affaires (un PIB) en hausse. Et une fois que nous avons franchi le seuil de la "vente à perte", cela signifie que les stocks sont significativement entamés et que les quantités résiduelles "valent cher", et donc que la consommation - croissante - que nous en ferons l'année suivante vaudra encore plus cher, et donc que nous vendrons encore plus à perte en les utilisant.

Ce raisonnement peut également s'appliquer aussi à l'échelle locale, avec par exemple une conséquence qui amusera (enfin c'est une manière de dire...) peut-être le lecteur : si toute entreprise qui émet des [gaz à effet de serre](#) (c'est à dire en fait toute entreprise, parce que rares sont celles qui n'ont pas au moins un bout de bureau chauffé, ou qui n'utilisent jamais - ne serait-ce que pour le déplacement des salariés - un moyen de transport) devait obligatoirement inclure dans ses comptes une "provision pour remise en état future du climat", dont [la limite supérieure est infinie](#), il est facile de voir qu'avec un niveau approprié - et pas plus stupide qu'autre chose - de valorisation du risque futur, plus aucune entreprise ne fait de bénéfice. Le résultat de n'importe quelle entreprise est donc, aujourd'hui, **conventionnel** : il ne tient que dans l'ensemble actuel de règles, lois et usages que nous avons, mais en prenant d'autres conventions, encore une fois pas plus idiotes qu'autre chose, les résultats du CAC 40 deviennent nuls ou négatifs en permanence, et le PIB "corrigé" baisse d'année en année.

La conclusion de cette affaire est d'une simplicité biblique : une valorisation de la diminution des stocks naturels à un niveau non absurde change le paradigme, et désormais plus nous croyons nous enrichir, plus nous nous apauvrissons. Et comme cela fait désormais quelques décennies que nous piochons dans les stocks naturels de manière importante (excessive ?), une convention pas plus idiote qu'une autre amènerait probablement à la conclusion que la décroissance a commencé dans les années 1970.

Combien plus cher payerions nous les choses avec une taxe carbone ?

dernière version : septembre 2003

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Parmi les diverses actions qui sont périodiquement suggérées pour permettre de freiner la [hausse des émissions](#) de [gaz à effet de serre](#), la possibilité de "taxer le carbone" revient souvent. Quel en serait le principe ? Tout simplement que tout ce qui émet des gaz à effet de serre ferait l'objet d'une taxe destinée à en dissuader plus ou moins fortement l'usage, un peu comme on taxe le tabac ou l'alcool.

Je n'entrerai pas ici dans des considérations sur le fait que cette taxe est légitime ou non. Tout au plus ferais-je remarquer qu'il me semble difficile d'escompter une quelconque modération des émissions tant que cette modération n'offrira aucun avantage à court terme, et que la taxe est un instrument particulièrement efficace pour permettre à la vertu d'être récompensée (puisque le comportement vertueux est moins taxé). Il me semble aussi important de signaler que l'argument classique contre la taxe (elle est source de dépenses supplémentaires pour les ménages modestes) trouve ici trois éléments de réponse :

- Il existe de nombreuses solutions pour éviter une injustice sociale à l'occasion de l'instauration d'une taxe (il est possible, par exemple, d'en diminuer une autre au même moment).
- Bien que cela ne soit pas du tout politiquement correct à dire, le drame du changement climatique c'est que, aujourd'hui, même les émissions d'un magasinier de grande surface, d'un manoeuvre ou d'un coursier sont "non durables". En France, tout le monde, ou à peu près, habite un endroit chauffé l'hiver, et quasiment tout adulte en âge de conduire se déplace en voiture : aujourd'hui [rien que cela suffit déjà à rendre les émissions "non durables"](#). Penser que l'on pourra réduire les émissions des pays industrialisés sans toucher aux émissions des ménages "modestes" est hélas un leurre.
- Enfin le monde étant fini [les émissions finiront bien par baisser un jour](#). Parmi les autres alternatives il y a une pénurie croissante, qui aura à court terme le même effet que la taxe (un renchérissement des prix) mais à cette différence importante près que l'argent ne rentre pas dans la même poche : la taxe est de l'argent qui ne quitte pas le sol national (on prélève ici pour alimenter le budget et donc redistribuer là, sous forme de services tels santé, éducation, transports etc) alors qu'un choc pétrolier, c'est de l'argent qui sort pour payer plus cher les producteurs. La taxe n'affaiblit pas globalement l'économie (elle favorise ceux qui vendent les services aidés, même s'ils sont publics) alors que le choc pétrolier si !

Si une [telle taxe](#) entrerait en vigueur, quel montant serait opportun ? Il n'y a évidemment pas de réponse unique à cette question. Pour la pédagogie de l'exposé, j'ai pris un niveau qui a très peu de chances d'être retenu dans un premier temps si une telle taxe entre en vigueur : 1.500 euros la tonne équivalent carbone, ce qui représente en gros un doublement du prix de l'essence à la pompe.

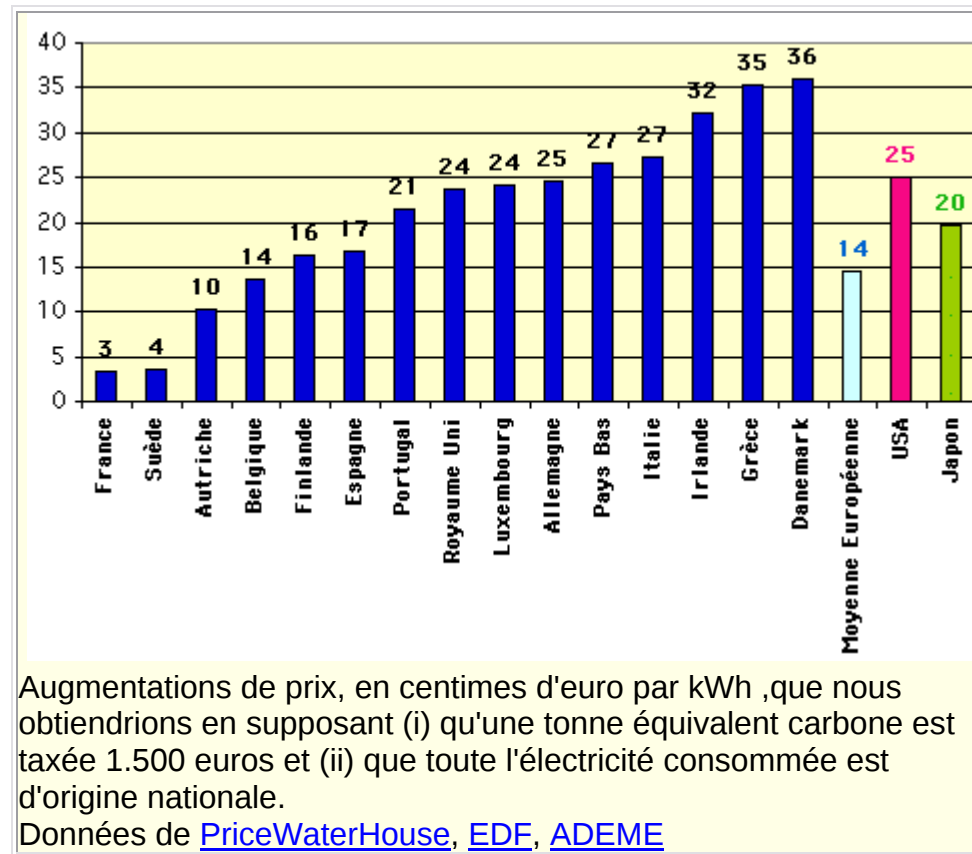
C'est donc beaucoup, mais c'est volontaire pour l'exercice : un niveau bien plus faible (de l'ordre de 100 à 150 euros la tonne de carbone, soit de 5 à 10 centimes en plus sur le prix de l'essence) ne permettront pas d'infléchir les comportements de manière compatible avec la diminution à atteindre.

Toutefois un tel niveau de taxe n'est pas du tout insupportable si la société s'adapte en conséquence, et rien ne permet de dire qu'elle aurait un effet macro-économique négatif sur l'activité humaine (par contre elle aurait un effet certain sur la consommation d'énergie, mais il faut savoir ce que l'on veut !). Une modélisation macro-économique indique même que l'introduction d'une telle taxe est globalement neutre pour l'économie (Commissariat au Plan : Effet de serre, modélisation économique et décision publique, mars 2002).

Sur la base d'un tel niveau de taxe, sans prétendre refaire à moi tout seul l'indice des prix de l'INSEE, je donne ci-dessous quelques exemples destinés à fixer les idées. Les valeurs indiquées sont dérivées de "contenus en carbone" que j'ai été amené à recenser (cas de l'électricité par exemple) ou à estimer (cas des autres rubriques) lors de divers travaux personnels.

Electricité

Le kWh en France verrait son coût augmenter de 3 centimes d'euros en moyenne (pour un prix actuel de l'ordre de 11 centimes d'euro), mais ce montant serait très différent pour les autres pays européens :



Ces différences viennent de la quantité très variable de gaz à effet de serre émis pour produire un kWh électrique en fonction de l'énergie primaire utilisée par la centrale. Si nous distinguons par type d'énergie primaire, l'augmentation de prix serait :

➤ en première approximation de 0 centimes d'euro par kWh pour les centrales nucléaires et hydrauliques (encore que les barrages sont peut-être des sources de méthane, qui est un [gaz à effet de serre](#), comme les autres zones humides !), [solaires à concentration](#) et éoliennes (mais ces dernières sont [rarement utilisables de manière autonome](#), ce qui pose un problème de méthode pour déterminer leur "contenu en gaz à effet de serre")

- 38 centimes d'euros par kWh pour le charbon (qui serait donc "sorti du marché" face à l'hydroélectricité et au nucléaire),
- 18 centimes d'euros par kWh pour le gaz (qui serait donc aussi sorti du marché face à l'hydroélectricité et au nucléaire !)
- une somme allant de 2 à 4,5 centimes d'euros par kWh pour le [solaire photovoltaïque](#) (à cause des émissions liées à la fabrication des panneaux).

Ce seul exemple illustre assez bien, à mon sens, tout ce qu'il y a de relatif à dire que telle ou telle forme de production d'électricité est "compétitive" (par exemple le gaz naturel). C'est évidemment facile d'être compétitif quand on comptabilise pour rien les dommages causés à l'environnement ! On voit bien qu'une comptabilisation - certes conventionnelle, mais pas à un niveau absurde - de la nuisance "effet de serre" rend la hiérarchie fort différente...

Transport

Voici ce qu'une taxe à 1500 euros la tonne de carbone engendrerait comme surcoûts sur les déplacements :

- en première approximation 0 euro par an pour des déplacements à pied, à vélo, en RER, en train électrique, à trottinette.
- pour 15.000 km par an en petite voiture en ville (8 l aux 100 en moyenne) : 1.300 euros environ
- pour 15.000 km par an en grosse voiture en ville (15 l aux 100 en moyenne) : 2.500 euros environ
- pour 50.000 km par an en moyenne/grosse voiture sur route (cas du VRP ; 8 l aux 100) : 4.400 euros environ
- pour un aller-retour transatlantique en avion : 1.100 euros environ en seconde (adieu l'hiver aux Caraïbes...)
- le même en bateau (sans naufrage) : environ 10 euros (bonjour les croisières).

Chauffage

Voici ce qu'une taxe à 1500 euros la tonne de carbone engendrerait comme surcoûts sur le chauffage d'une maison ou d'un appartement :

- pour 3.000 l de fioul dans l'hiver : 3.600 euros environ
- pour le même confort au gaz : 2.800 euros environ
- pour le même confort à l'électricité : tout dépend ! Si toute l'électricité vient de centrales à charbon : presque 10.500 euros (mais [en France ce n'est pas le cas](#) !). Si on ne tire que sur des centrales nucléaires et hydrauliques : à peu près 0 ...
- pour le chauffage au bois, si le bois provient de forêts replantées : pas grand chose (il faut déduire les émissions de la coupe, du débardage et du transport, qui représente l'équivalent de quelques euros)

Alimentation

Même ce que nous mangeons subirait les effets d'une telle taxe, mais ce n'est pas très étonnant quand on sait qu'[en France la première source d'émissions est l'activité agricole](#) :

- pour le boeuf et le mouton : environ 6 euros en plus par kg de carcasse chez le producteur (donc probablement jusqu'au double chez le boucher pour de la viande sans os) : adieu les steacks de 500 g....
- pour le poulet ou le porc : environ 1,5 euro de plus par kg avec os pour le poulet digne de ce nom (mais la moitié seulement pour le poulet de batterie, celui dont les os peuvent presque servir de chewing gum),

- pour la farine : environ 30 centimes d'euro de plus par kg, et pour les pâtes probablement 40 centimes en plus par kg,
- pour les lychees de la Réunion : environ 5 euros de plus par kg ; pour les oranges d'Espagne par camion : un peu moins d'un euro de plus par kg.

D'une manière générale les fruits et légumes de saison (et les oeufs) ne verraient pas leur prix augmenter de manière forte (sauf s'ils sont fortement emballés, voir ci-dessous), les volailles et cochonnailles augmenteraient un peu (de l'ordre de 1,5 euro le kg), le fromage prendrait jusqu'à 4 euros de plus le kg, le boeuf verrait son prix augmenter très fortement (doublement ou triplement). Le mouton, s'il est élevé dans des prairies non fertilisées (d'alpage par exemple) n'augmenterait "que" de 2 à 3 euros par kg.

Les produits de l'industrie agroalimentaire (biscuits, yaourts, plats cuisinés surgelés...) subiraient des augmentations de prix allant de 1 à 10 euros le kilo (cela ne concerne probablement pas le caviar !).

Les fruits et légumes importés de Pétaouchnok par avion (mangues, lychees, mais aussi haricots verts du Kenya) seraient "sortis du marché" par un surcoût de plus de 5 euros par kg.

Enfin le poisson verrait son prix augmenter de 0,5 à 3 euros le kg.

Produits manufacturés ou services

Je n'ai pas fait de calculs détaillés pour tout ce que l'on trouve dans une boutique ! (calculs [qui sont bien sur possibles](#) si l'on a accès aux données ad hoc). Les données ci-dessous sont des ordres de grandeur.

- une petite voiture, pesant une tonne : environ 2.200 euros en plus ; une grosse jusqu'à 4.000 euros en plus
- un ordinateur :avec écran plat : une estimation au doigt mouillé donne 500 euros en plus,

- la construction d'une maison de 100 m² : environ 20.000 euros en plus
- une prime d'assurance ou une facture de téléphone de 1.000 euros par an : de l'ordre de 50 à 100 euros en plus (dépend du contenu en carbone de l'électricité utilisée par les services, entre autres choses).

Tous ces montants sembleront peut-être déraisonnables, mais il faut garder une chose en mémoire : si 1.500 euros la tonne équivalent carbone semble un montant élevé dans un cadre volontaire, ce sera peut-être bien en-dessous de la réalité si la réduction n'est pas le fruit de notre souhait mais simplement la conséquence d'une régulation involontaire !

Qu'est-ce que les permis d'émission ?

dernière version : mars 2005

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Les [négociations internationales](#) prenant place dans le cadre de la convention climat ont conduit certains pays à s'engager à faire baisser leurs émissions de gaz à effet de serre, pour parvenir à l'objectif de cette convention qui est d'éviter un changement climatique dangereux du à l'homme. Mais une fois le principe adopté au niveau d'un état, comment traduire cela en diminution de la part des acteurs concernés, qui sont les entreprises et les particuliers ?

Plusieurs voies s'offrent en théorie à la puissance publique :

- on peut réglementer ou légiférer : chaque acteur, sous peine de sanctions, doit diminuer sa consommation de x%.
- on peut passer des accords négociés : chaque acteur, ou groupe d'acteurs, s'engage sur une réduction en contrepartie d'avantages donnés. Toutefois si des contraintes effectives sont prévues en cas de non respect des engagements, et vu que l'une des parties à l'accord est l'Etat, cela se ramène à un règlement.

➤ on peut taxer : chaque tonne équivalent carbone émise sera "imposée", de telle sorte que les entreprises auront intérêt, pour payer le moins cher possible, à diminuer leurs émissions le plus possible. Comme elles s'arrêtent dès que le coût de réduction est supérieur à celui de la taxe, en fixant le coût de la taxe on règle le "thermostat" (ou plutôt le "taxostat" !) sur le niveau de réduction souhaité.

Le système des permis d'émission est juste, en théorie, un moyen de "mettre de l'huile dans les rouages" pour permettre à un ensemble d'acteurs d'atteindre un objectif collectif que l'on a fixé par ailleurs (suite à une loi, ou à un accord négocié). Imaginons que l'on demande à toutes les entreprises de diminuer leurs émissions de 10% en 2 ans.

L'entreprise A n'a pas de problème pour cela. En fait, elle pourrait même aller assez facilement jusqu'à 20% de réduction : c'est un fabricant de biscuits et avait décidé de passer du pétrole au gaz pour chauffer ses fours de toute façon.

L'entreprise B va avoir beaucoup de mal à faire mieux que 5%, quels que soient les moyens financiers investis dans l'affaire : c'est un fabricant de verre, et il faudrait pour atteindre son objectif qu'il remplace totalement ses lignes de production, et même en commençant aujourd'hui cela nécessite au moins 3 ans.

L'idée du permis négociable est que l'entreprise A et l'entreprise B puissent "s'arranger entre elles" pour que le résultat de A+B soit effectivement une baisse de 10% de leurs émissions globales. Concrètement, A va "vendre" à B les économies que A peut faire facilement et B très difficilement. Les "permis d'émission" désignent précisément ces économies réalisées au-delà de l'objectif global et que l'on peut vendre à quelqu'un d'autre : on lui vend le "droit d'émettre", ou le "permis d'émettre", au-delà de ce qui devrait normalement être autorisé.

Dans la pratique, A et B ne se connaissent pas nécessairement, de même qu'un acheteur et un vendeur ne se connaissent pas nécessairement avant la vente. Il faut donc organiser un "marché" où les entreprises qui font facilement des économies puissent les vendre à celles qui en font difficilement. C'est ce "marché", avec une description de la manière dont les "économies" peuvent d'échanger, et dans quelles limites, qui s'appelle un système de permis d'émission.

On voit tout de suite que ce système est par nature globalement équilibré : un permis ne peut s'acheter qu'auprès d'une entreprise qui a dépassé ses objectifs et qui vend le "dépassement" à une entreprise qui peine. Ce système n'a pas pour but de permettre à

tout le monde de dépasser ses objectifs, et c'est du reste mathématiquement impossible (tant que l'objectif global est atteint, bien sur) : dans un marché, il ne peut y avoir que des acheteurs ! Il n'y a donc rien de fondamentalement immoral dans ce système : c'est un simple moyen, qui peut s'avérer utile, de lisser les disparités. Mettre en place un système de permis ne signifie pas que l'effort collectif de réduction est limité.

On peut aussi organiser un marché entre pays : certains pays vont pouvoir aller au-delà de leurs engagements, d'autres n'y arriveront pas. L'idée est alors de transférer, dans des conditions qui restent à définir, les gains supplémentaires des uns aux autres. Rappelons que le système des permis ne peut se mettre en place qu'entre les [pays dits de l'annexe 1](#) (c'est à dire essentiellement les pays industrialisés) et que **ce système ne permet absolument pas aux pays riches d'acheter les éventuelles réductions d'émissions des pays pauvres pour éviter tout effort chez eux.**

D'aucuns ont stigmatisé cette idée en parlant de "droits à polluer", qui seraient inacceptables. Il faut bien voir que le "droit à polluer" s'applique déjà partout dans notre vie quotidienne :

- la "redevance pour eaux usées" de nos factures d'eau n'est rien d'autre qu'un "droit à polluer",
- acheter de l'essence n'est rien d'autre que de payer "un droit à polluer" (l'essence pollue !)
- la taxe pour l'enlèvement des ordures ménagères est un "droit à polluer"
- tout arrêté préfectoral autorisant une installation classée est de fait un droit à polluer dans la limite fixée par l'arrêté,
- plus généralement toute norme est un droit à polluer jusqu'à la norme, toute taxe un droit à polluer jusqu'à la taxe, etc.

Les principaux inconvénients des permis d'émission ne sont pas d'ordre moral mais sont des difficultés pratiques :

- il faut se mettre d'accord sur l'objectif collectif de réduction,

➤il faut pouvoir sanctionner le non respect des engagements, donc définir des pénalités et leur montant, ainsi que les entités concernées,

➤ces permis ne sont pas adaptés aux "petites" sources individuelles : les moyens à mettre en oeuvre pour mesurer, contrôler et gérer les émissions des chaudières de maison ou des véhicules particuliers seraient colossaux. Or si l'on ne prend pas en compte le transport et le chauffage c'est près de 50% des émissions de CO₂ qui "passent à la trappe".

➤et surtout, il faut se mettre d'accord sur la manière dont on répartit les émissions : il faut définir les modalités de passage d'une réduction collective, donc d'une "autorisation" collective à des autorisations individuelles : donne-t-on à chacun au prorata de ses émissions de l'année précédente (ce qui avantage immédiatement les gros émetteurs inefficaces, qui pourront plus facilement réduire par la suite), ou au prorata de l'émission moyenne du secteur par unité de production (ce qui avantage immédiatement ceux qui sont plus performants que la moyenne, donc les plus faibles émetteurs) ?

➤Enfin la question suivante reste en suspens : quand une société n'a pu atteindre ses objectifs pour une période donnée qu'en achetant des permis, sur quelle base lui fixe-t-on son objectif de la période suivante ? A partir du niveau qu'elle a réellement atteint, ou a partir du niveau qu'elle aurait du atteindre ?

Par rapport aux permis, la taxe (sur les produits conduisant à des émissions, comme l'essence par exemple, ou sur les émissions elles-mêmes) a l'avantage d'une facilité de gestion bien plus grande :

➤elle évite la discussion sur la répartition initiale de l'effort, ou plus exactement elle fait de la négociation individuelle (pour payer moins) un cas particulier et non la règle,

➤son coût est immédiatement proportionnel à la nuisance, et elle ne représente donc pas une prime aux mauvais élèves comme l'est un système de permis avec un niveau de référence qui est celui des émissions historiques (quand chacun doit faire l'année suivante -X% par rapport à l'année précédente, sans distinguer entre ceux qui ont déjà un niveau d'émissions très bas et ceux qui ont encore un niveau très élevé),

- les coûts de gestion sont beaucoup plus faibles, car la perception peut se faire de manière très concentrée (chez les pétroliers ou les fournisseurs d'électricité - pour les centrales à gaz et à charbon - par exemple),
- si la taxation se fait sur les précurseurs d'émissions (comme l'essence par exemple) il n'y a pas besoin de mesurer - ou de calculer - les émissions elles-mêmes chez les consommateurs pris un par un.

Par ailleurs, la taxe est perçue sur l'ensemble des émissions, alors que les permis n'ont pour assiette que les quotités échangées.

Mais la taxe - qui serait la chose à faire si nous sommes cohérents entre notre souhait de sauver la planète et ce que nous sommes prêts à supporter personnellement - suppose un contexte un peu harmonisé au niveau mondial, sinon le risque de "dumping fiscal" est grand : les gros émetteurs de gaz à effet de serre pourraient se délocaliser dans des pays peu ou pas taxés, et, comme [le lieu d'émission est sans importance pour les gaz à effet de serre](#), le but recherché - qui est une diminution globale des émissions - pourrait ne pas être atteint.

L'équation de Kaya

dernière version : décembre 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Emissions de gaz à effet de serre, économie, intensité énergétique, population... Il y aurait un lien entre ces diverses grandeurs, que chacun - physiciens, économistes ou politiques, ingénieurs, démographes - aime à utiliser dans son coin ? Une équation, géniale parce que si simple (et, comme on va le voir, si terrible !), et que la rumeur attribue à un professeur japonais dénommé Kaya (ce qui est sûr, c'est que le Professeur Kaya en question est un chercheur connu pour les questions de politique énergétique), permet de relier entre elles ces notions, même si pour la majorité de mes concitoyens "on ne voit pas le rapport avec la choucroute".

Cette équation part du principe, très simple - et dont des générations de collégiens se souviennent sûrement ! - que l'on peut toujours multiplier ou diviser par un même nombre de chaque côté d'une égalité.

Notre égalité de départ est on ne peut plus évidente. Appelons CO₂ les émissions mondiales de gaz carbonique, le [principal gaz à effet de serre](#) d'origine humaine, et nous pouvons écrire :

$$CO_2 = CO_2$$

Jusque là, tout le monde devrait suivre ! Mais attendez la suite... Appelons maintenant TEP la quantité d'énergie consommée dans le monde (par référence à l'unité "tep", ou "tonne équivalent pétrole", généralement utilisée quand on parle d'énergie). Tout le monde sait que, quand nous avons une égalité, il est possible de multiplier et diviser un des côtés par n'importe quoi de non nul. TEP étant non nul, nous pouvons, de l'un des côtés, à la fois multiplier et diviser CO₂ par TEP, ce qui donne.

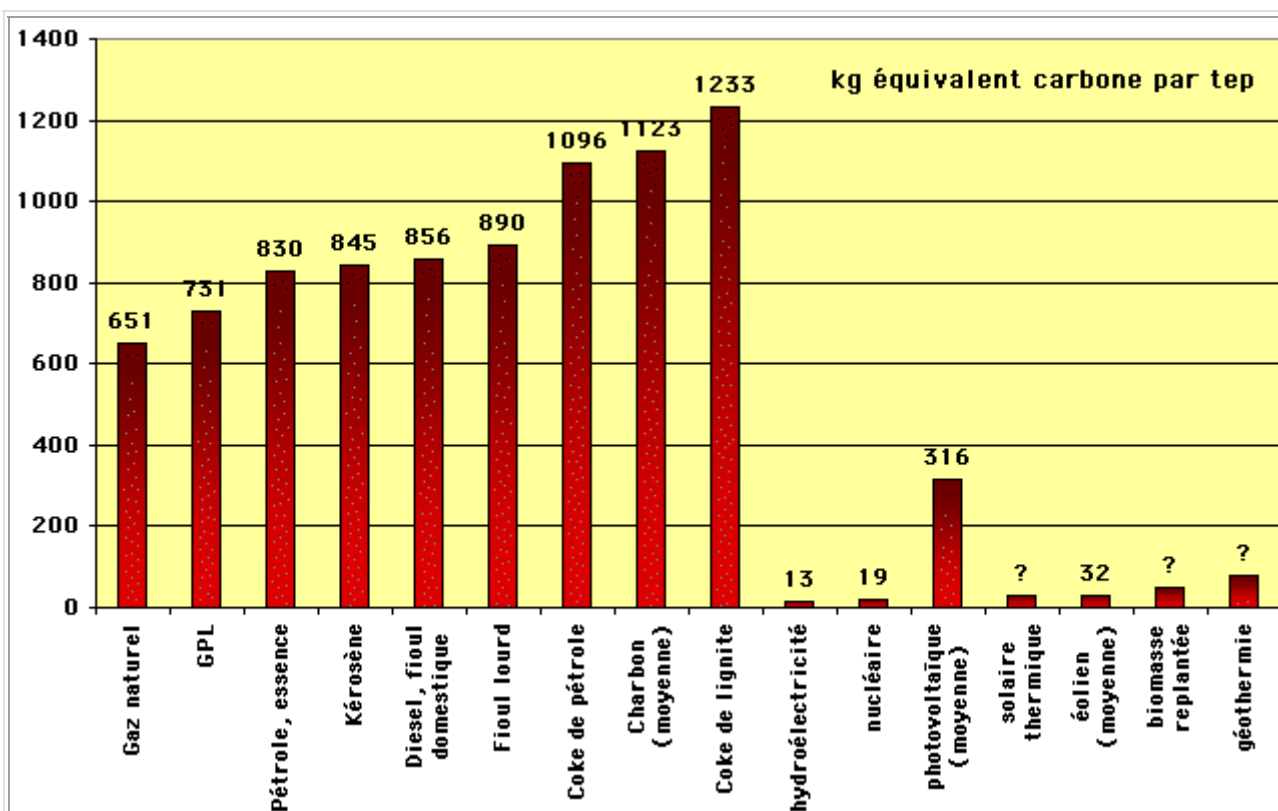
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} * TEP$$

Quel intérêt ? C'est que nous venons juste d'écrire que :

Emissions de gaz carbonique	=	Contenu en gaz carbonique de l'énergie	*	Quantité d'énergie consommée
-----------------------------	---	--	---	------------------------------

En effet, la division des émissions par l'énergie (GES/TEP) porte le nom de "contenu en CO₂ de l'énergie" : c'est la quantité de CO₂ qu'il faut émettre pour disposer d'une quantité d'énergie donnée. Cette quantité n'est pas égale quelle que soit l'énergie "primaire" utilisée (l'énergie primaire est celle que nous trouvons sans transformation dans le monde qui nous entoure : pétrole brut, charbon, eau en mouvement, atomes fissionables, etc, par opposition à l'énergie finale qui désigne celle que nous pouvons utiliser pour nos applications, mais que nous ne trouvons pas telle quelle dans la nature : électricité, essence raffinée, etc).

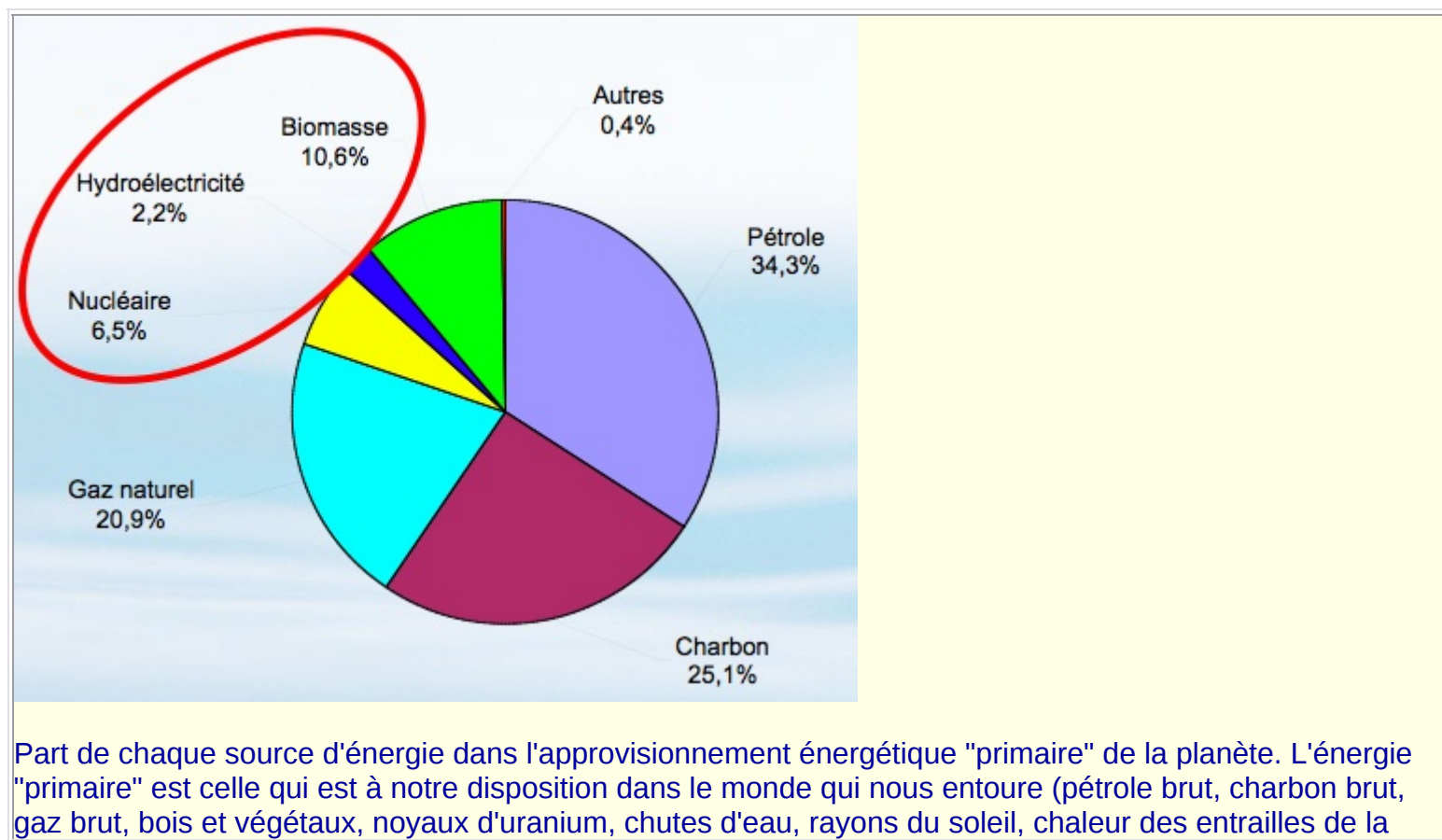
Ce "contenu en CO₂ de l'énergie" peut même très fortement varier selon les choix technologiques que nous effectuons (par exemple la production d'électricité est plus ou moins émettrice de CO₂ selon les choix technologiques faits).



"Contenu en gaz à effet de serre" (en fait essentiellement "contenu en gaz carbonique") par tonne équivalent pétrole d'énergie finale pour diverses énergies. L'électricité est convertie sur l'équivalence énergie finale (1 TEP = 11,6 MWh). Les points d'interrogation signifient que j'ai une vague idée de l'ordre de grandeur, mais que les chiffres précis varient d'une analyse à l'autre.

D'après [PNUE](#), [Ademe](#), [EDF](#).

Ce premier graphique permet déjà de voir que, pour une consommation énergétique donnée, les émissions de CO₂ dépendront beaucoup de la répartition des diverses sources que nous décidons d'avoir (ou pouvons avoir....). Pour information, l'essentiel de l'énergie que nous consommons actuellement dans le monde émet du CO₂ (graphique ci-dessous), et la seule manière de faire baisser le "contenu en gaz carbonique de l'énergie" est de faire croître la part des énergies "sans carbone" (renouvelables et nucléaire) dans le mix.



terre, etc).

L'énergie que nous utilisons au quotidien n'est pas de l'énergie primaire, mis "finale" : carburants raffinés, gaz purifié, électricité (qui n'est pas une énergie primaire, et qui est aussi "propre" que l'énergie primaire avec laquelle elle est fabriquée), etc. L'hydrogène, soit dit en passant, est une énergie finale, et non primaire (la "[civilisation hydrogène](#)" est donc aussi propre que l'énergie primaire utilisée pour faire l'hydrogène).

Les énergies "sans carbone" sont celles incluses dans l'ellipse rouge.

Source : Agence Internationale de l'énergie.

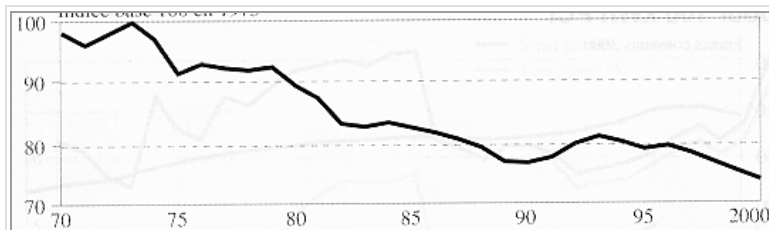
Nous pouvons alors répéter l'exercice consistant à multiplier et diviser par le même nombre. Multiplions et divisons le côté droit par PIB, c'est à dire le produit intérieur brut, autrement dit l'unité qui mesure l'activité économique.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} * \frac{TEP}{PIB} * PIB$$

Nous avons maintenant écrit :

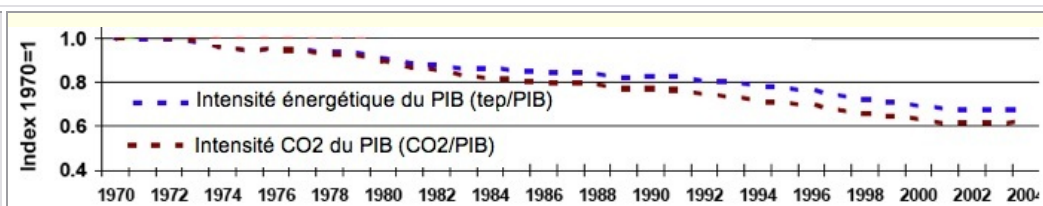
$$\text{Emissions de gaz carbonique} = \text{Contenu en gaz carbonique de l'énergie} * \text{intensité énergétique de l'économie} * PIB$$

En effet, la division de l'énergie par le PIB (TEP/PIB) porte le nom de "intensité énergétique de l'économie" : c'est la quantité d'énergie qu'il faut utiliser pour produire un dollar (ou un euro) de biens ou services. L'intensité énergétique de l'économie est sur une pente descendante depuis le début de l'ère industrielle, en première approximation, parce que l'efficacité de l'économie n'a cessé de croître.



Quantité d'énergie consommée par euro de PIB en France, base 100 en 1970 (attention les ordonnées ne partent pas du zéro !). Ce que dit cette courbe est que pour produire un euro de PIB en France en 2000 il faut utiliser 25% d'énergie en moins qu'en 1970

Source [Observatoire de l'Energie](#).



Quantité d'énergie consommée par dollar de PIB dans le monde, base 1 en 1970 (courbe bleue ; la courbe marron ne sert à rien ici mais je ne suis pas arrivée à l'enlever proprement !). Ce que dit cette courbe est que pour produire un dollar de PIB en 2004 dans le monde il faut utiliser 30% d'énergie en moins qu'en 1970.

Source [GIEC](#).

Bien que cette donnée baisse, il est facile de voir dès à présent que de se focaliser sur cette seule partie de "l'équation" est oublier le reste, et notamment évacuer dès à présent le débat suivant : est-on sûr que si l'intensité énergétique du PIB diminue ce n'est pas essentiellement... parce que PIB augmente plus vite que la consommation d'énergie ? (et en fait [c'est bien ce qui se passe](#)).

Enfin il nous reste à inclure la démographie pour que la discussion puisse devenir intéressante. Appelons POP la population, et multiplions et divisons la partie droite de l'égalité par ce terme, ce qui donne :

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} * \frac{TEP}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

Traduit en Français, nous avons maintenant écrit :

$$\text{Emissions de gaz carbonique} = \text{Contenu en gaz carbonique de} * \text{Intensité énergétique de} * \text{Production par} * \text{Population}$$

l'énergie

l'économie

personne

Le terme PIB/POP est en effet d'usage très courant, et s'appelle indistinctement "production par personne", ou encore ... "richesse" (bien que [le PIB ne mesure en rien la richesse](#) mais juste les revenus annuels). Et voilà comment il est possible d'exprimer les émissions de CO₂ (mais le raisonnement général pourrait s'appliquer à l'ensemble des gaz à effet de serre) en fonction de paramètres qui vont permettre de savoir si la dématérialisation est à portée de la main. Maintenant, la discussion intéressante commence !

Que faire de tout cela ?

Bon, voici une belle équation. Et après ? Après nous voyons déjà que toute discussion portant sur un seul des facteurs de droite n'est pas suffisante pour parvenir à une conclusion sur les émissions (à gauche). Ainsi, quand Bush a annoncé, en 2003 (ou peu avant), qu'il allait diminuer l'intensité énergétique de l'économie américaine de 18% en 10 ans, il est facile de voir que cela ne porte que sur l'un des termes de cette égalité (TEP/PIB). Et le reste ? Si la production économique par personne (PIB/POP) augmente de 25% dans le même temps (ce qui représente une croissance de 2,5% par an, soit un objectif conservateur pour n'importe quel gouvernement), avec une population (POP) qui augmente de quelques % dans le même temps (simple prolongation des tendances aux USA), et un contenu en carbone qui reste constant (assertion raisonnable compte tenu des tendances actuelles aux USA, particulièrement dans le secteur de l'électricité), le résultat sera une hausse des émissions de CO₂, pas une diminution !

Revenons à nos moutons : il est établi que pour cesser d'enrichir l'atmosphère en gaz carbonique il faut [diviser les émissions mondiales par 2 au moins](#). Si nous voulons éviter des conséquences potentiellement très désagréables, il faut y arriver à l'horizon de quelques décennies, disons d'ici 2050. Mais la très mauvaise nouvelle est que cela arrivera même si nous ne le voulons pas, car la terre est finie.

En effet, les émissions de CO₂ proviennent des hydrocarbures que nous consommons et des forêts que nous défrichons, et tout cela est en quantités finies : [le stock d'hydrocarbures est fini](#), et la surface de forêts est finie. De ce seul fait les mathématiques

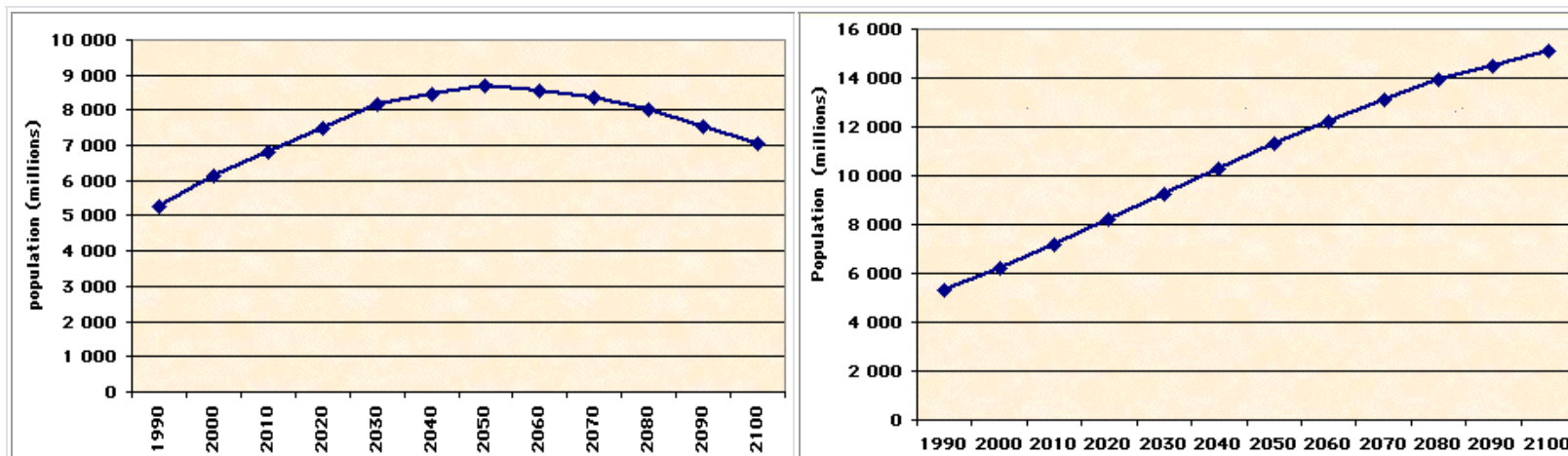
nous enseignent que les émissions vont passer par un maximum et inexorablement décroître avec le temps ensuite (en tendance lourde, évidemment). En langage mathématique, on dit que les émissions de CO₂ n'ont pas d'autre choix que de tendre vers zéro à l'infini, et cela signifie en particulier qu'il viendra un jour où ces émissions seront devenues "pour toujours" inférieures de moitié aux émissions actuelles, et même "un jour" inférieures "pour toujours" au quart des émissions actuelles, etc.

Bref, dans notre équation ci-dessus nous devons donc viser une division de la partie gauche de l'égalité par 2, et même si nous ne la visons pas nous l'aurons un jour. Comme le grand mérite d'une égalité est que les deux termes doivent être égaux (si si !), cela signifie que l'ensemble des termes de droite doit aussi être divisé par 2 - ou le sera même si cela ne nous plait pas.

Qu'allons nous donc diviser par 2 ou par autre chose ?

➤Peut-on diviser la population mondiale par 2 ? Le décider de manière planifiée et rapide (50 ans c'est court) portant le nom désagréable de massacre ou de génocide, il est peu probable que cela constitue une option considérée de manière sérieuse. Et compter sur une épidémie (qui devrait aussi diviser par 2 la population des pays riches, [gros émetteurs](#)) pour faire le travail à notre place peut difficilement être souhaité !

En fait, si nous allons demander leur avis aux démographes, ces derniers disent volontiers que la population s'achemine plutôt vers une multiplication par 1,5 d'ici quelques décennies. Cette prolongation est bien sûr valide si aucune régulation n'intervient : aucun scénario démographique ne fait autre chose que de l'ajustement de taux de mortalité et de fécondité, et ces taux ne sont jamais "programmés" pour refléter une évolution brutale que nous ne pouvons pourtant pas exclure (chute d'un météorite, guerre nucléaire et retour à la barbarie, épidémie massive, et [toute savante combinaison de petits malheurs](#), y compris les conséquences alimentaires, sanitaires ou politiques du changement climatique).



Deux exemples d'évolution démographique pour les décennies à venir utilisés pour les [scénarios d'émission de gaz à effet de serre](#) (à gauche, A1, à droite, A2). Ces deux scénarios considèrent que la population mondiale atteindra 9 milliards de personnes, à quelque chose près, en 2050. Ces scénarios sont bien sûr discutables, mais ils représentent la vision "conventionnelle" dont il est intéressant de voir si elle est un tant soit peu compatible avec notre problème !

Source : [GIEC](#)

Puisque la population est tendanciellement multipliée par 1,5 alors que les émissions doivent être divisées par 2, cela signifie que l'ensemble des autres facteurs doit être divisé par 3 (les mathématiques, c'est bête comme chou parfois !).

➤Peut-on alors diviser la production par habitant (PIB/POP) par 3 ? Cela supposerait un choix délibéré de récession, évolution qui comporte certes quelques avocats (les partisans de la "décroissance" par exemple), mais on ne peut pas dire que cela corresponde à la "vision conventionnelle" de l'avenir de l'immense majorité de mes concitoyens (ce qui ne veut pas dire que la récession soit peu probable ! Cela signifie juste que la mise au régime "à froid" par les élus pour se prémunir contre un danger futur n'est pas l'attitude la plus courante). Par exemple, les propos électoraux - approuvés par la masse - de n'importe quel ministre ou président de la république sont en général très favorables à la hausse du pouvoir d'achat, or le pouvoir d'achat, à quelques bricoles près, c'est très exactement le PIB par personne.

Dit autrement, nous souhaitons tous les jours que "la croissance" perdure, chez les riches comme chez les pauvres. Une augmentation conservatrice de 2% par an du PIB par habitant, ce qui est bien en-dessous de ce que tout élu tente d'obtenir lorsqu'il est en fonctions, multiplie cette valeur par 2,7 en 50 ans, ce qui signifie que le reste des autres facteurs de la partie droite de notre équation doit alors être divisé par 9 : à gauche, on divise par 2 ; à droite on multiplie par 4,5 le PIB mondial (cette multiplication par 4,5 se décomposant en x 1,5 pour la population et x 3 pour le PIB par personne).

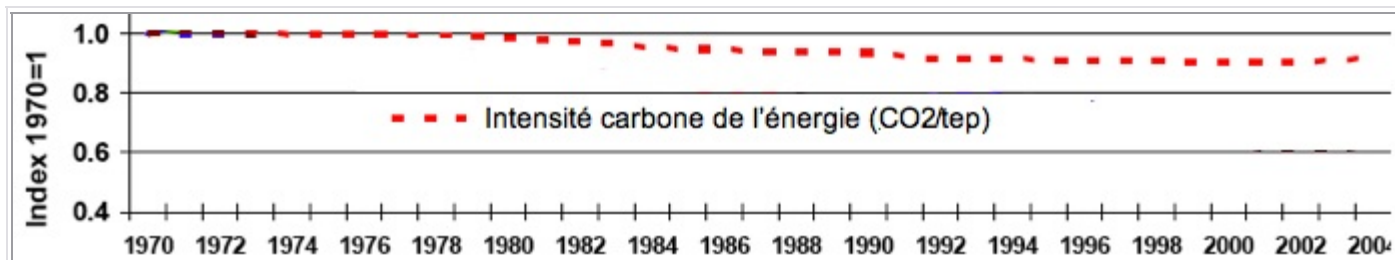
Rappelons, avant de passer à la suite, que l'augmentation du PIB désigne uniquement la croissance de la production de produits ou services faits de la main de l'homme, mais compte pour zéro la disparition concomitante et irréversible des ressources non renouvelables - minerais, énergies fossiles... - qui ont été nécessaires pour leur mise à disposition. La prise en compte de ce deuxième facteur à un niveau pas plus idiot qu'un autre pourrait nous amener à considérer que [nous sommes déjà en décroissance](#)...

En "vision conventionnelle de l'avenir", nous voici donc avec une division par 9 - disons 10 pour nous simplifier la vie - à réaliser sur le produit :

Contenu en gaz carbonique de l'énergie	*	Intensité énergétique de l'économie
--	---	-------------------------------------

➤L'intensité énergétique peut-elle être divisée par 10 en 50 ans ? Elle a baissé de 30% en 35 ans dans le monde ([graphique ci-dessus](#)) ; la prolongation d'un taux de diminution identique amène à une réduction de 40% en 50 ans, mais c'est une hypothèse optimiste, parce que ce sont les premiers efforts qui sont les plus faciles à faire. Passons, et supposons que nous puissions gagner un facteur 2 d'ici 2050. L'intensité énergétique étant alors de 50% de ce qu'elle est aujourd'hui, c'est donc un facteur 4 à 5 par lequel il faut diviser GES/TEP

➤Dit autrement, il faut donc diviser le "contenu en gaz carbonique de l'énergie" par un facteur 4 au moins, alors que ce "contenu en gaz carbonique de l'énergie" a juste gagné 10% sur les 35 dernières années...



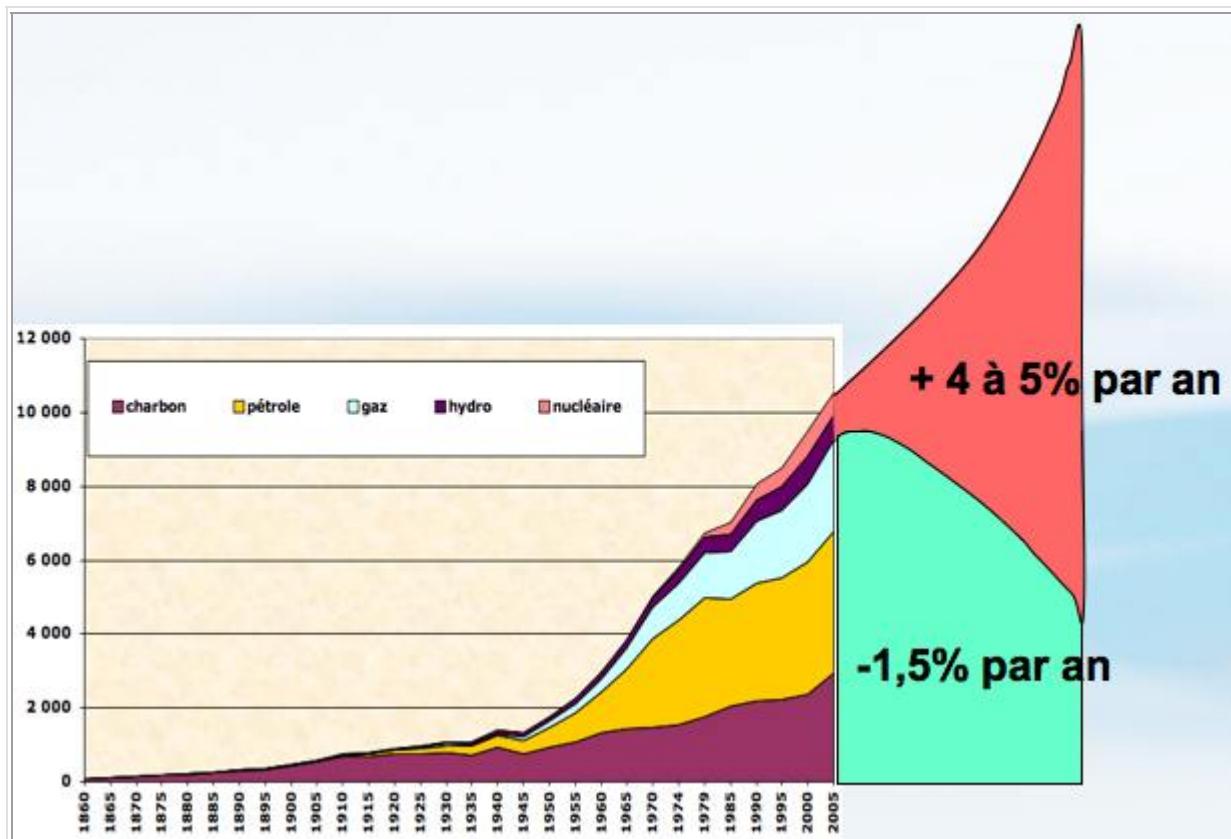
Quantité de gaz carbonique émis pour disposer d'une unité d'énergie , base 1 en 1970. Ce que dit cette courbe est que pour disposer d'un kWh (ou d'une tep, peu importe) d'énergie primaire en 2004 dans le monde, il faut émettre 10% de CO₂ de moins que pour disposer de ce même kWh en 1970. Et il faudrait que cette "intensité en carbone de l'énergie" perde 75% en 45 ans !

Source [GIEC](#).

➤Au surplus il faut parvenir à cette "décarbonisation de l'énergie" en doublant l'approvisionnement (car le produit des trois termes

Intensité énergétique de l'économie	*	Production par personne	*	Population
-------------------------------------	---	-------------------------	---	------------

n'est rien d'autre que la consommation d'énergie). En clair, cela signifie que dans le même temps que l'approvisionnement en provenance des fossiles baisse de 1,5% par an, celui en provenance des renouvelables et du nucléaire augmente de 4,5% par an, pour être multiplié par 7 en 45 ans. Une représentation graphique de la chose est proposée ci-dessous.



Représentation graphique approximative de l'approvisionnement énergétique mondial pour poursuivre la croissance économique avec, sur les 45 ans à venir :

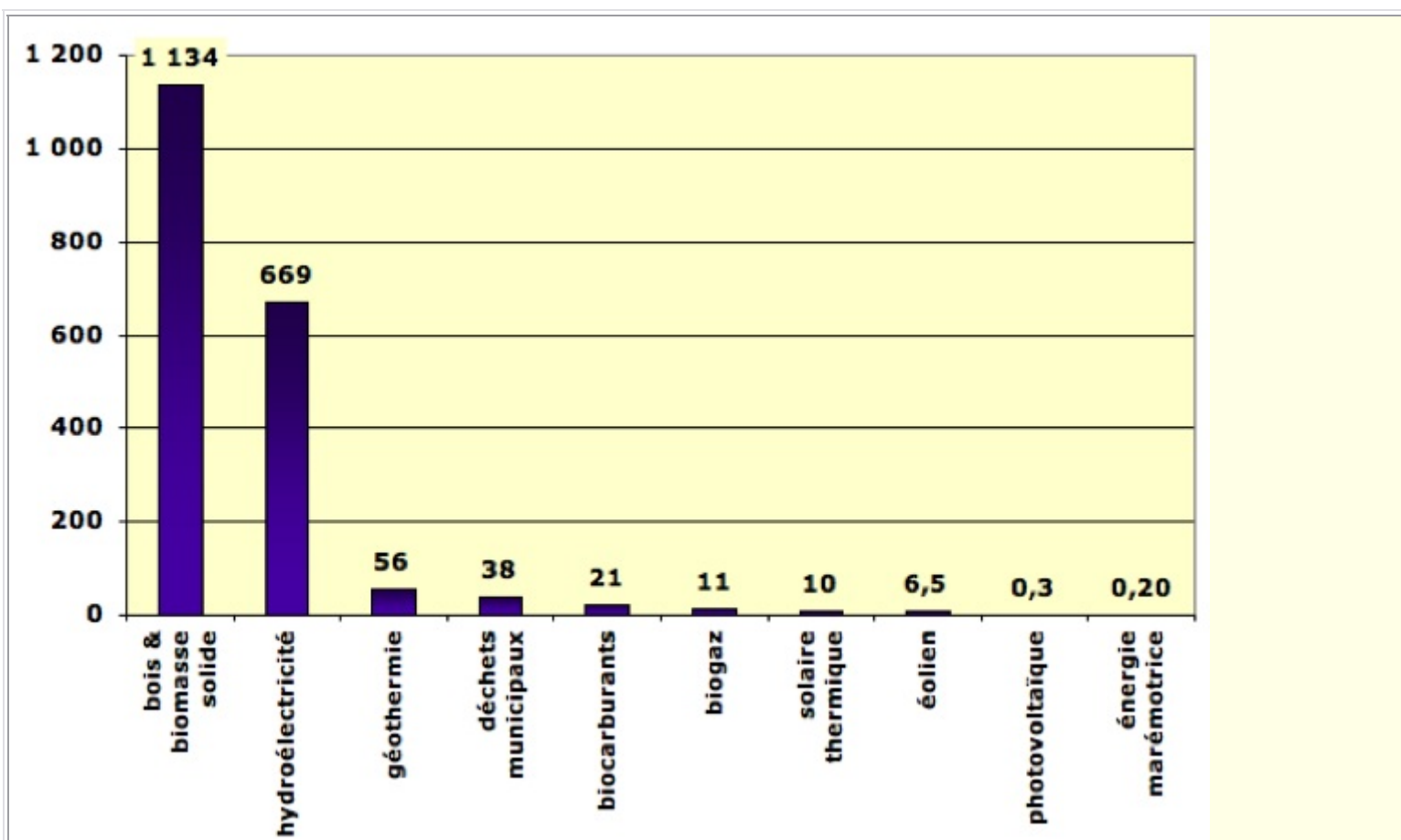
- un gain d'un facteur 2 sur l'efficacité énergétique
- une croissance annuelle moyenne du PIB par personne de 2% (soit une multiplication du PIB par 2,7 sur 50 ans),

- un gain de 75% du contenu en carbone de l'énergie sur la période.

NB : le bois n'est pas représenté sur ce graphique, et les renouvelables hors bois sont limitées à l'hydroélectricité (ce qui en 2005 est une excellente approximation).

Source [GIEC](#).

Question : Peut-on multiplier la contribution du nucléaire et des renouvelables par 7 en 45 ans ? Commençons par les renouvelables, qui en 2005 fournissent à l'humanité un gros 15% de sa consommation d'énergie (électricité en équivalence primaire), soit 1,9 milliard de tonnes équivalent pétrole.



Contributions estimées des énergies renouvelables au bilan énergétique mondial en 2005, en millions de tonnes équivalent pétrole (1 tonne équivalent pétrole = 11600 kWh ; l'électricité est convertie sur l'équivalence [énergie finale](#)). La consommation d'énergie de l'humanité est de 11,1 milliards de tonnes équivalent pétrole (soit 11 100 millions, si je sais encore compter), ce qui permet de constater que le bois fait à peu près 10% du total mondial, l'hydroélectricité 5%, et ensuite tout le reste est marginal.

Source [GIEC](#).

Pouvons-nous multiplier cet ensemble par 7 ? Pour se faire une idée, continuons donc notre petit jeu idiot des règles de trois, en regardant source par source :

➤ Une énergie du bois multipliée par 7 doit alors fournir 8 milliards de tonnes équivalent pétrole par an, sans engendrer de déforestation, alors que dès le niveau actuel de prélèvement les forestiers considèrent que 10% à 20% du bois consommé provient de la déforestation. Sachant qu'un hectare de forêt fournit environ 3 tonnes équivalent pétrole par an en mode "renouvelable" en moyenne mondiale (mode "renouvelable" signifie que ce qui est coupé est uniquement ce qui a poussé dans l'année), cela signifie qu'il faut avoir 26 millions de km² de forêts dédiées à la production d'énergie, soit les 2/3 des forêts actuelles. Si nous utilisons des cultures plus "rentables" que le bois, on peut monter à 5 à 6 tonnes équivalent pétrole par hectare et par an, mais la question est de savoir quelles terres utiliser pour cela. Pas des terres agricoles, qui seront nécessaires pour manger, alors celles actuellement couvertes par la forêt, pour remplacer la forêt existante par des plantations de miscanthus ? En pareil cas, on peut dire adieu à la biodiversité !

➤ Une hydroélectricité multipliée par 7 (dans le même temps) signifie multiplier par 7 les turbinages au fil de l'eau et les lacs de barrage. Dans un certain nombre de zones géographiques c'est peut-être envisageable, au prix de nuisances environnementales non négligeables, mais sûrement pas en Europe, où [l'essentiel de ce qui est équipable est équipé](#).

➤ Si nous passons ensuite aux autres sources (biogaz, biocarburants, éolien, photovoltaïque, etc), même multipliées par 7 elles restent parfaitement marginales et c'est par bien plus de 7 qu'il faudrait les multiplier dans les 45 ans qui viennent. Incidemment nous pouvons constater que pour les énergies renouvelables, il y a une loi qui fonctionne assez bien : leur importance dans l'approvisionnement énergétique mondial est inversement proportionnelle à leur place dans les media !

Vient ensuite le nucléaire : une multiplication par 7 de la production revient à disposer, d'ici 45 ans, d'un parc de 2.400 réacteurs de 1000 MW en service. C'est 6 fois le parc actuel de 450 réacteurs, ou encore l'équivalent du nombre actuel de centrales à charbon, ou encore 7.000 milliards de dollars d'investissements (le PIB mondial tourne actuellement autour de 36.000 milliards par an). Ce n'est pas complètement impossible physiquement, mais cela représente un investissement considérable, et surtout cela

suppose de déployer très rapidement de la surgénération. Et si nous voulons "décarboniser" complètement l'économie avec juste du nucléaire parce que les petits calculs ci-dessus montrent que ça ne passera pas du côté des renouvelables à ces échelles de temps, c'est le double qu'il faut avoir : là je deviens franchement sceptique !

Bien entendu, une autre alternative est de considérer d'entrée de jeu la décroissance de la consommation matérielle par individu comme normale (ce qui [inclut aussi les services qui nécessitent des minerais ou de l'énergie](#)). Cela revient à accepter la mise au régime comme une évolution souhaitable de nos sociétés. Nous n'en voulons pas, bien sûr, [comme déjà Tocqueville l'avait indiqué](#). Mais même si nous le refusons, pouvons nous l'éviter ?

Nous avons vu que la division par deux des émissions de CO₂ (terme de gauche de notre équation de Kaya) est [inéluçtable "un jour"](#). L'observation des tendances historiques montre que les ingénieurs vont avoir du mal à aller assez vite sur la "technique" (car le terme TEP/PIB désigne de manière synthétique tout ce que les ingénieurs savent faire pour proposer des voitures, des cafetières, et des maisons plus économes) et sur "l'énergie sans carbone" (car le terme CO₂/TEP désigne de manière synthétique tout ce que les ingénieurs savent faire pour augmenter la part des renouvelables et du nucléaire dans l'offre énergétique) pour permettre une division par 10 du "contenu en CO₂ de l'économie". Cette division par 10 est pourtant indispensable pour avoir à la fois la croissance économique ET la baisse des émissions de CO₂ (qui finira par gagner).

L'égalité devant rester vraie, cela signifie alors que la division par 2 de l'ensemble des termes de droite a toutes les chances (si l'on peut dire) de provenir d'une baisse des termes POP et/ou PIB/POP. La règle de trois est impitoyable : avec les indicateurs que nous utilisons, [la décroissance sera très difficile à éviter](#), non par idéologie, mais parce que, hélas pour nous, le monde est fini. L'une des conclusions pratiques que j'en tire est qu'il est urgent d'oublier le PIB. Utiliser un indicateur qui va très vraisemblablement se mettre à descendre - pour des raisons mathématiques - en tendance lourde n'est pas dans la nature humaine. Si cette descente semble difficilement évitable, [changeons d'indicateur](#) pour garder espoir !

Faut-il souhaiter la croissance du trafic aérien ?

juillet 2000 - dernière modif : novembre 2004

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

L'exercice qui suit vise à illustrer l'importance du transport aérien dans les émissions de gaz à effet de serre. Il s'agit d'une illustration sur un exemple concret, mais le propos se veut plus large : il s'agit de faire prendre conscience de l'importance de ce poste et du fait qu'il n'est peut-être pas opportun de chercher à en préserver la croissance.

J'ai également illustré le fait que certains opposants sont assez proches du "[faites ce que je dis, pas ce que je fais](#)".

Un avion long courrier moderne, par exemple l'A340-600 d'[Airbus](#), peut transporter 380 passagers en configuration "normale" sur 3 classes (ci-dessous).



Il peut par ailleurs parcourir 13.900 km et requiert pour cela 194.800 litres de carburant (données constructeur).

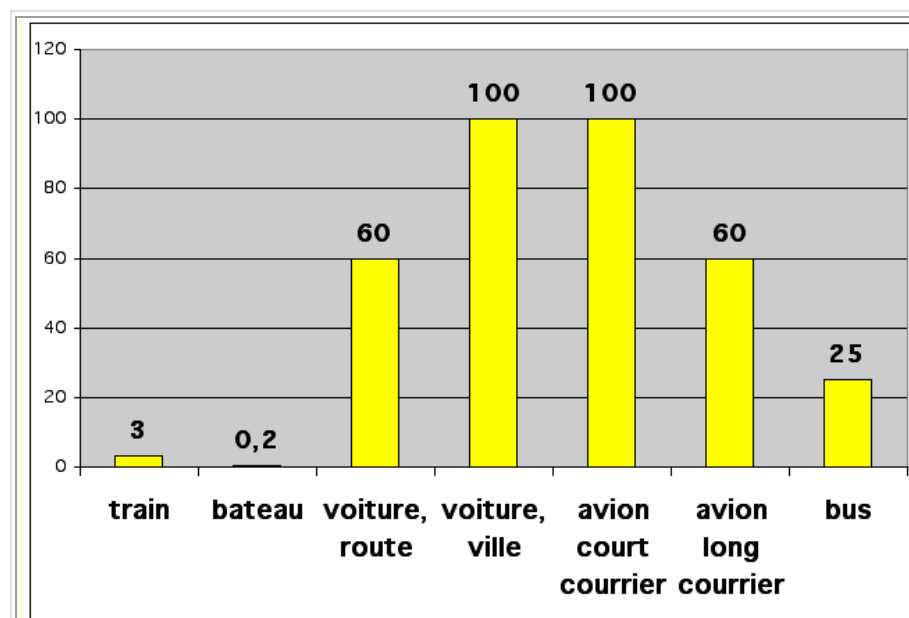
Un rapide calcul montre donc qu'un avion de cette génération consomme $194.800 \div (13.900 \times 380) = 0,037$ litre de carburant par passager et par kilomètre tout compris en utilisation optimale.

Ce dernier point est important : si l'avion n'est pas plein, la consommation par passager.km augmente, or le taux de remplissage moyen des avions n'est pas de 100% mais plutôt de 70% à 80%. Dans la pratique, la consommation réelle de chaque passager international (regroupant moyen et long courrier) est de l'ordre de 5 litres aux 100 pour une compagnie ayant des avions récents (type Air France).

Par ailleurs si l'avion n'est pas utilisé sur sa distance maximale, le décollage et l'atterrissage étant proportionnellement plus gourmands en carburant, la consommation par passager.km augmente aussi de manière significative. Enfin les avions les plus anciens sont aussi les plus gourmands en carburant (Concorde détenait la palme pour les avions commerciaux !). Le calcul qui suit constitue donc une borne inférieure de ce à quoi je veux en venir.

La distance moyenne d'un vol long courrier (ou international) est de 6.495 km (source : Ministère Anglais des Transports). Sur une telle distance, en supposant l'avion plein, un passager consomme donc $0,037 \times 6495 = 240$ litres de kérosène, et émet donc 165 kg d'équivalent carbone pour le seul CO₂, et en fait 2 fois cela, soit 330 kg d'équivalent carbone, si l'on tient compte des autres émissions ([voir ci-dessous](#)).

Il en résulte que chaque passager aérien long courrier émet autant de gaz à effet de serre que s'il était seul en grosse voiture sur la même distance.

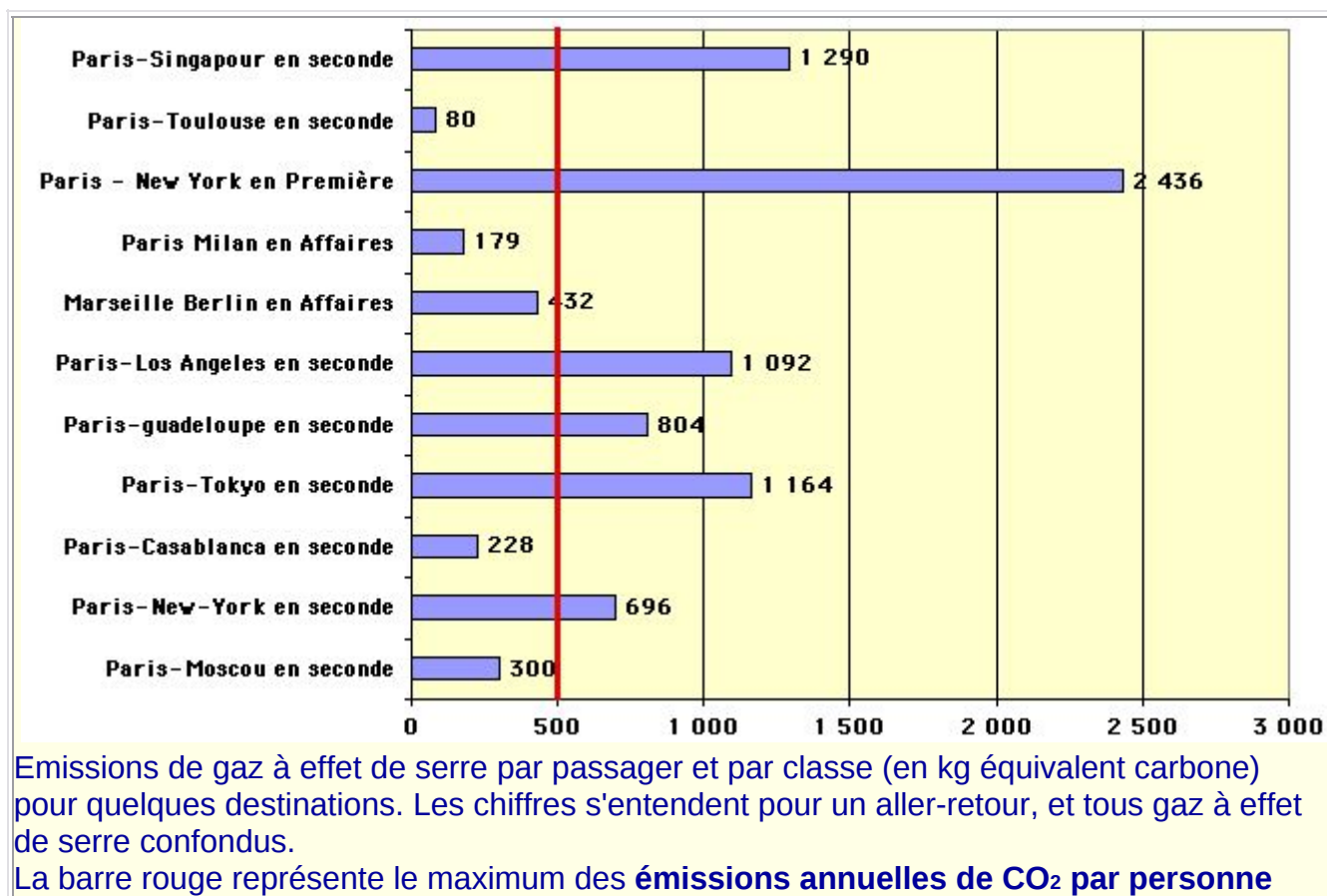


Emissions de gaz à effet de serre par mode motorisé, en grammes d'équivalent carbone par passager.km. On constate que l'avion et la voiture sont à peu près au même niveau à distance égale.

Sources : [ADEME](#), [INRETS](#), calculs personnels.

Un calcul de même nature indique que pour un vol court courrier (ou vol domestique, distance moyenne 500 km) un passager consomme à peu près le double par km, soit un total d'environ 25 kg d'équivalent carbone pour 500 km pour le seul CO₂, soit 50 kg avec toutes les émissions. Chaque passager en court courrier émet presque autant de gaz à effet de serre que s'il était seul en petit camion !

Bien évidemment, les émissions engendrées par un vol sont alors très importantes.



auquelles il faut redescendre pour stabiliser la concentration en CO₂ dans l'atmosphère.
Manifestement la lutte contre le changement climatique n'est pas compatible avec un transport aérien généralisé.
Sources : Jancovici/Ademe, d'après Bilan Carbone

Faut-il construire le 3^e aéroport parisien ?

Ceci étant dit, Aéroports de Paris ([ADP](#)) donne les statistiques suivantes pour le trafic passager en 1999 de Orly et Roissy.

Destination/Origine	Millions de passagers	Variation 1999/1998
Métropole	21,0	+ 6,3 %
Union Européenne	21,1	+ 8,0 %
Autre Europe	4,2	+ 0,5 %
Afrique du Nord	3,3	+ 20,4 %
Autre Afrique	2,3	+ 6,4 %
Amérique du Nord	6,5	+ 12,3 %
Amérique Latine	1,4	+ 17,0 %
Dom-TOM	3,3	+ 6,0 %
Moyen-Orient	2,3	+ 26,1 %

Extrême-Orient	3,3	+ 9,1 %
----------------	-----	---------

On voit sur le tableau ci-dessus que les destinations hors métropole croissent plus vite (9% en moyenne si on fait le calcul) que celles en métropole.

Par ailleurs les destinations en métropole ne représentent qu'un tiers (en gros) des destinations totales.

Une prolongation tendancielle donnerait, au bout de 20 ans :

➤ 71 millions de passagers annuels en Métropole

➤ 292 (autrement dit 300) millions de passagers annuels en provenance ou à destination de l'étranger, soit 80% du total.

Sans tenir pour valides les chiffres en valeur absolue, ce qui n'aurait pas de sens (300 millions de passagers !), nous pouvons supposer, pour la suite, que 80% des passagers d'un nouvel aéroport prendraient un long courrier lorsque cet aéroport sera au maximum de sa capacité. C'est d'autant plus légitime, me semble-t-il, qu'à cette époque les destinations de métropole les plus fréquentées seront quasiment toutes à moins de 3h30 par le train (or un voyage en avion, tout compris : déplacement jusqu'à et de l'aéroport, enregistrement, retards !, etc, ne prend pas souvent beaucoup moins de 2 à 3h).

Un 3^e aéroport, permettant 50 millions de passagers par an (comme Roissy au maximum de sa capacité), dans les conditions optimales décrites ci-dessus (qui ne seraient pas atteintes, ce qui compense dans le calcul pour les sous-estimations que j'ai pu faire sur d'autres postes), avec 80% du trafic en long courrier, permet donc aux émissions suivantes d'exister :

➤ pour la partie court courrier, $10 \text{ (millions de passagers)} \times 50 \text{ (kg équivalent carbone par vol)} = 500.000 \text{ tonnes équivalent carbone par an}$

➤ pour la partie long courrier, $40 \text{ (millions de passagers)} \times 330 \text{ (kg équivalent carbone par vol)} = 13.200.000 \text{ tonnes équivalent carbone par an.}$

Total : 13.700.000 tonnes équivalent carbone.

Dans ce total, je n'ai pas pris en compte les émissions des avions 100% cargo (dont je ne connais pas le nombre).

Quand on sait qu'un Français émet en moyenne 2,8 tonnes équivalent carbone par an tous gaz confondus, sans les puits), cela veut dire que de construire une troisième infrastructure aéroportuaire parisienne serait rendre possible l'équivalent de ce qu'émettent 5 millions de Français ; c'est encore l'équivalent de presque 10% de nos émissions nationales actuelles. Même une infrastructure à 25 millions de passagers annuels représenterait encore 5% de nos émissions nationales. Il s'agit bien entendu des émissions des avions prises sur toute la longueur du vol.

Il est donc totalement incohérent de vouloir **en même temps** lutter contre l'[effet de serre](#) et construire cette plate-forme supplémentaire. D'une manière générale, il est totalement incohérent de vouloir lutter contre l'effet de serre si l'on permet par ailleurs l'[augmentation du trafic aérien](#) en construisant ou améliorant les infrastructures aéroportuaires.

Le raisonnement indiqué ci-dessus pourrait donc tout autant être appliqué au passage de 25 à 50 millions de passagers à Roissy, à la construction de l'aéroport du Grand Ouest (entre Nantes et Rennes), au développement de Satolas, de Nice, etc. Bien sûr, c'est bien l'augmentation - à laquelle les pouvoirs publics ne fixent pas de limite actuellement - du trafic aérien qui est responsable de l'augmentation des émissions, pas l'augmentation du nombre de plates-formes en tant que tel.

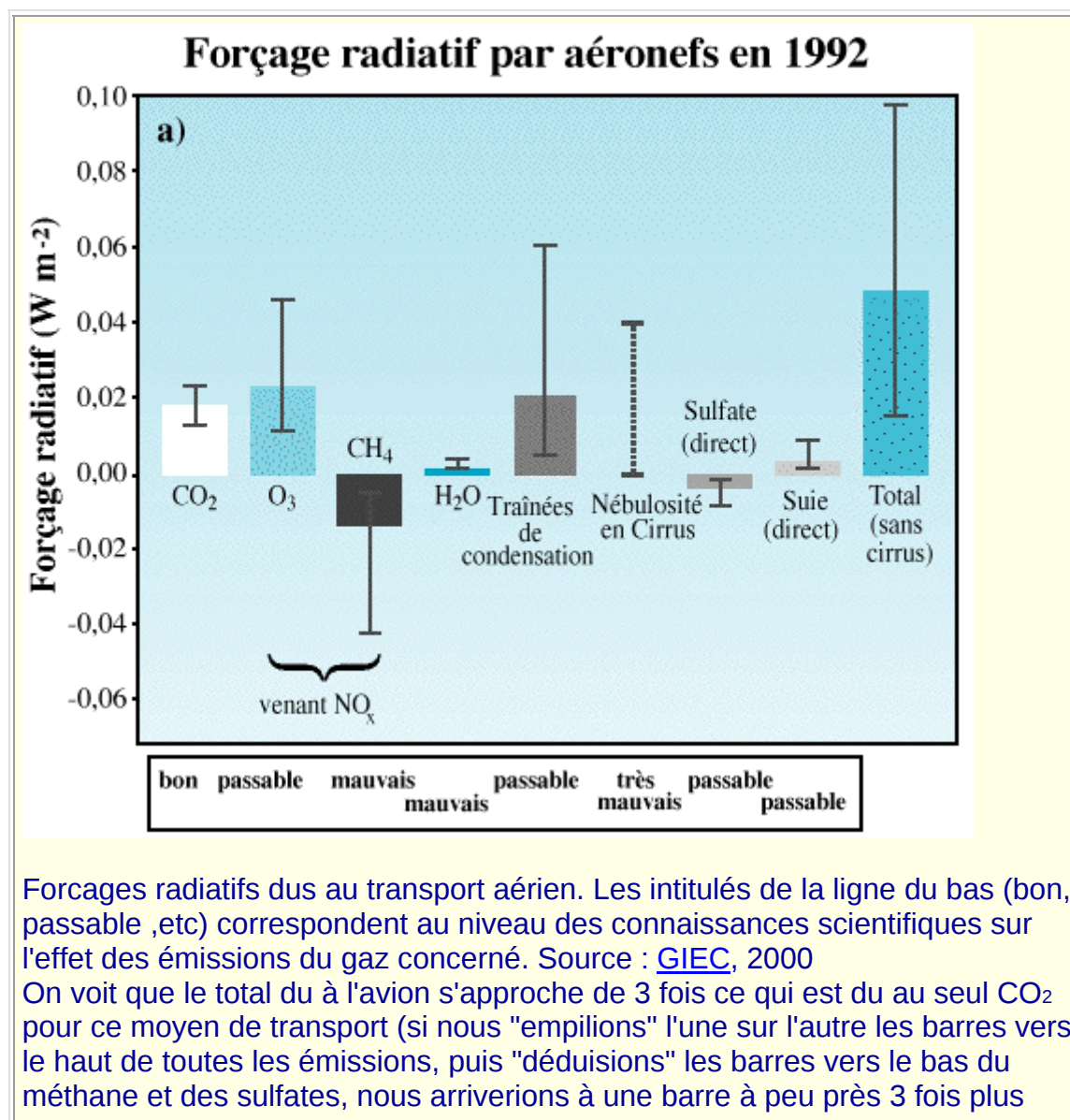
Le lien de l'un à l'autre est cependant évident en cas de saturation des infrastructures existantes, ce qui est actuellement le cas.

Plus généralement, quelle est l'importance du trafic aérien dans les émissions de gaz à effet de serre ?

Pour le seul CO₂, le trafic aérien est responsable d'environ 2% à 3% des émissions de la planète (selon les sources), c'est-à-dire environ les émissions de la Grande Bretagne (ou 1,5 fois celles de la France), ce qui n'est déjà pas rien. En France, le transport aérien (y compris les vols internationaux arrivant en ou partant de France) consomme à peu près 25% de ce que consomment les voitures particulières : c'est donc très loin d'être négligeable !

En outre les émissions de CO₂ du transport aérien, sur les décennies récentes, ont tendance à augmenter bien plus vite que celles du reste de nos activités. Ainsi, de 1990 à 2002, les émissions de CO₂ du monde ont augmenté de 15%, pendant que celles du transport aérien ont augmenté d'environ 30% (soit deux fois plus vite).

Mais les avions sont aussi des émetteurs importants d'autres [gaz à effet de serre](#) (vapeur d'eau, ozone, cf. figure ci-dessous). Le pourcentage est donc probablement supérieur si l'on prend en compte tous les gaz à effet de serre.



haute que celle du CO₂), alors que pour l'ensemble des activités humaines ce ratio est de 1,5.

Le transport aérien contribue donc à quelque chose qui est plus proche de 4% des émissions anthropiques (d'origine humaine) de tous les gaz à effet de serre.

Si nous prenons en compte les émissions des avions hors CO₂, ainsi que nous y invite le graphique ci-dessus, les avions partant de France (y compris les vols intérieurs) émettent autant que la moitié des voitures particulières ! Les voitures particulières ont consommé environ 25 millions de tonnes de pétrole en 2001 ; les avions 6 (c'est à dire que les avions présents sur les aéroports Français ont acheté 6 millions de tonnes de kérosène), mais comme un litre de pétrole brûlé dans un avion "compte au moins double" (graphique ci-dessus), les avions "équivalent" au moins à 12 millions de tonnes de pétrole brûlées dans des voitures, soit 50% de la consommation des voitures particulières.

Par ailleurs ce trafic croît au rythme de 5% à 10% par an (avec quelques hoquets, de temps en temps, mais cela n'a jamais entamé la tendance de fond jusqu'à maintenant) : la projection haute du [GIEC](#) aboutit à une multiplication par 15 des émissions de CO₂ d'ici à 50 ans, ce qui amènerait le trafic aérien au delà du niveau actuel des USA (qui font 25% des émissions mondiales en 2000).

C'est donc un poste qui est loin d'être négligeable pour l'avenir, et en outre les émissions liées au trafic aérien international échappent totalement aux accords du type Kyoto (qui ne les prennent pas en compte, officiellement pour des raisons de difficulté de méthode, qui de fait ne sont pas minces : à quel pays attribuer les émissions d'un passager Suisse prenant British Airways pour aller de Paris à Naples ?).

Que penser du discours de certains opposants ?

Mon propos n'est pas ici de stigmatiser un parti politique en particulier, mais de montrer que, comme ailleurs, le discours public et les actes personnels ont parfois du mal à s'entendre.

Les Verts ont souvent indiqué qu'ils étaient contre ce troisième aéroport, sur le principe même, car étant contre l'augmentation du trafic aérien. Or en décembre 2001, trois de leurs principaux dirigeants (Mme Voynet et MM. Mamère et Lipietz) sont partis en vacances aux Antilles. Sauf à ce que je sois mal informé, ils n'y sont pas allés en kayak de mer ou en pédalo, mais bien en avion, et je ne pense pas que les nécessités du service puissent être invoquées pour prendre l'avion quand il s'agit de vacances.

Dès lors que l'on fait quelque chose soi-même, il me semble difficile d'en dénier le droit aux autres. Si chaque Français a le droit de se comporter aussi vertueusement qu'un dirigeant de parti écologiste (lequel parti prône en outre une forte équité), et a donc le droit de prendre l'avion une fois par an pour partir en vacances, cela engendrera 122 millions de passagers (par an) de ce seul fait (les passagers sont comptés à l'aller et au retour).

En 2000, le trafic aérien en France a représenté 80 millions de passagers (source DGAC), avec Roissy à 25 millions et Orly à 20 millions.

Si chaque Français a le droit de se comporter comme un dirigeant de parti écologiste, donc, alors il est impératif de permettre au trafic annuel de gagner au moins 40 millions de passagers, et, sauf à doubler les trafics d'Orly et de Roissy, il devient inéluctable de faire un 3^e aéroport parisien. Être contre cet aéroport supplémentaire signifie par contre implicitement que l'on accepte que l'avion (re)devienne un luxe réservé à une minorité de la population, ou une minorité d'usages. Taxer fortement le kérosène aurait très exactement cet effet. Quels "écologistes" auront le courage de le reconnaître ouvertement ? Et tous ceux qui s'insurgent contre cet aéroport supplémentaire feront-ils l'effort de ne pas prendre eux-mêmes l'avion à tout bout de champ ?

Faut-il remplacer les centrales nucléaires par des centrales à gaz ?

juillet 2000 - révisé février 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Mon propos ici est juste d'éclairer le débat par un ordre de grandeur. Que chacun en tire la conclusion qu'il pense opportune.

Une centrale nucléaire (en fait un réacteur, c'est à dire une tranche ; il y a plusieurs tranches par centrale) de 1000 MW (1 MW = 1.000 kW) de puissance nominale (les tranches actuelles vont de 900 à 1400 MW) produit $1000 \times 24 \times 365 =$ environ 8.700 GWh (1 GWh = 1.000.000 kWh) par an. Il faut normalement tenir compte d'un taux d'indisponibilité "technique" (c'est à dire pour la maintenance et les pannes) mais comme il est faible (de 5 à 10%) on le néglige pour un calcul en ordre de grandeur.

NB : le taux de disponibilité des centrales françaises est en fait plus proche de 80%. Cela n'est pas une conséquence de la technique, mais du fait que les centrales n'ont pas besoin de tourner tout le temps pour le moment.

Si on fait de l'électricité avec du gaz naturel (méthane), on émet environ 400 g de CO₂ par kWh (dépend en fait du type de cycle et du rendement de l'installation).

Il s'ensuit que pour faire 8.700 GWh (soit 8.700.000.000 kWh) avec du gaz, on émet environ 3 million de tonnes de CO₂, soit de 900.000 tonnes équivalent carbone. Cela veut dire que de **remplacer un seul réacteur nucléaire** par du gaz naturel conduit à augmenter les émissions de CO₂ d'une quantité équivalente à ce qui est produit par **toute l'agglomération grenobloise**.

Quelques autres considérations sur le fait que de recourir massivement au gaz est une fausse bonne idée peuvent se trouver [ici](#).

Extrapolons

Quand on produit un kWh d'électricité, cela conduit à des émissions de CO₂ très variables selon l'énergie primaire (l'énergie "initiale") qui est utilisée (les explications sur le "[contenu en gaz à effet de serre](#)" du kWh peuvent se trouver ici) :

Emissions de CO ₂ en g/ kWh (analyse du cycle de vie)	
charbon	800 à 1050 suivant technologie
cycle combiné à gaz	430
nucléaire	6
hydraulique	4
biomasse bois	1500 sans replantation

photovoltaïque	60 à 150
éolien	3 à 22

La France a consommé environ 500 TWh (un TWh = 1.000.000.000.000 Wh, ca fait beaucoup !) d'électricité en 2005 (source : Observatoire de l'Energie), c'est à dire 500.000.000.000 kWh, dont 75% environ, soit 400 TWh, sont issus de centrales nucléaires (il s'agit d'ordres de grandeur). Par ailleurs notre pays a émis de 560 à 650 millions de tonnes équivalent CO₂ de [gaz à effet de serre](#) (sans prise en compte des puits) en 2004 (NB : les émissions peuvent varier selon le format d'inventaire, et notamment selon que l'on compte la combustion de la biomasse ou pas dans les émissions brutes).

Il s'ensuit que si nous faisons un remplacement total du nucléaire par une autre énergie primaire (cette hypothèse est totalement irréaliste pour le bois, l'éolien, le photovoltaïque ou l'hydraulique, mais elle serait aujourd'hui faisable pour le gaz ou le charbon), nous aurions des émissions supplémentaires représentées dans ce tableau (sans [séquestration](#)) :

Emissions en cas de substitution du nucléaire par d'autres combustibles			
Combustible	g de CO ₂ (moyenne) par kWh produit	millions de tonnes de CO ₂ supplémentaires si nous remplaçons 400 TWh "nucléaires" par....	% d'augmentation des émissions brutes de gaz à effet de serre en France (en 2005)
Charbon	900	360	55% à 65%
Cycle combiné à gaz	430	150	25% à 30%
Nucléaire	6	0	0%
Hydraulique	4	-1	0%
Biomasse bois (sans replantation)	1500	600	100%
Photovoltaïque	50 à 100	70 à 140 (sans stockage)	8% à 15%
Eolien	10	20 (sans stockage)	3%

On constate donc que de remplacer tout le nucléaire par du gaz augmenterait nos émissions (tous gaz à effet de serre confondus) de 25% environ, à supposer qu'il n'y ait pas de fuites, car le gaz naturel est un puissant [gaz à effet de serre](#). Quelques % de fuites du puits à l'utilisation finale rendent le gaz aussi "néfaste" que le charbon.

Remplacer le nucléaire par du charbon (qui sera la dernière des [ressources fossiles disponibles](#)) augmente les émissions de plus de 50%. Notons aussi que cela engendrerait de l'ordre de 20 à 30 millions de m³ de cendres par an, soit 20.000 fois plus que le volume des déchets nucléaires, cendres qui sont aussi toxiques (elles contiennent des tas de résidus dangereux dont des déchets radioactifs ; ce n'est pas un hasard si Marie Curie a découvert le radium dans des matériaux provenant d'une mine de charbon !) et dont le lessivage par la pluie, par exemple, conduit à des pollutions de nappes phréatiques.

On comprend ici que simplement en substituant du charbon par du gaz pour sa production d'électricité l'Allemagne arrive à faire baisser ses émissions de 25% environ, mais toutefois les Allemands seront encore de bien plus gros [émetteurs par habitant](#) que les Français après cette substitution : remplacer le gaz par du nucléaire leur permettrait de gagner un autre 25%.

On voit aussi que de ce point de vue le solaire ou l'éolien ne sont pas avantageux par rapport au nucléaire, par contre ils le sont par rapport au pétrole ou au gaz : il s'ensuit que de prôner la sortie du nucléaire pour les remplacer par du [solaire](#) et de l'[éolien](#) ne fait pas gagner un gramme sur les émissions de gaz à effet de serre, outre que c'est complètement irréaliste puisque ce sont des énergies intermittentes et que l'électricité ne se stocke pas.

D'une manière plus générale, remplacer le nucléaire par de l'électricité d'origine renouvelable (hydraulique notamment) conduit juste à cumuler les efforts, car il faut **en même temps** [diviser par quatre la consommation de gaz et de pétrole](#) de chacun d'entre nous. Sachant que les énergies renouvelables [ne sont pas disponibles en quantités infinies](#), il faut les utiliser en priorité pour remplacer gaz, pétrole et charbon si nous voulons lutter efficacement contre le changement climatique, et non s'en servir pour remplacer le nucléaire, sur lequel bien des débats mériteraient par ailleurs de [prendre un peu de hauteur de vue](#).

[Allons dans le sens inverse](#)

Supposons maintenant que toute la production d'électricité mondiale actuellement faite avec des combustibles fossiles soit nucléarisée, ou à peu près. Il s'agit bien sur d'un exercice académique, mais dont le résultat permet là aussi de comprendre de quoi on parle.

En 2001, la production mondiale (valant la consommation mondiale, puisque l'[électricité ne se stocke pas en grandes quantités](#)) totalisait 15.684 TWh, dont 17% provenaient de centrales nucléaires, et 17% de l'hydroélectricité, une autre [source "sans carbone"](#). J'ai considéré comme éligibles pour une nucléarisation totale du reste tous les pays possédant déjà soit l'arme atomique (car c'est le principal argument des opposants à la généralisation du nucléaire dans le monde) soit un niveau de culture suffisant pour opérer des centrales (qui est supposé acquis quand des centrales existent déjà : on ne refait pas l'histoire !).

Voici la production électrique qui serait alors concernée.

Nucléarisation maximale du parc de centrales électriques : calcul			
Region	Twh produits en 2001	Possède déjà l'arme atomique, des centrales, ou un niveau de culture compatible avec une forte nucléarisation	Consommation éligible
Amérique du Nord	4.756	oui	4.756
Amérique Latine & centrale	802	essentiellement non	0
Europe	3.464	oui	3.464
Ancien URSS	1.286	essentiellement oui	1.286
Afrique	444	essentiellement non	0
Moyen Orient	496	essentiellement non	0
Asie Pacifique (*)	4.436	essentiellement oui	4.436
Total Monde	15.684	-	13.943

(*) dont Chine, Inde, Australie, Japon et Corée du Sud qui font plus de 80% de la zone

Il s'avère donc que 14.000 Twh environ sur 15.684 sont produits dans des pays ayant déjà la Bombe (ce que l'on peut regretter, et que personnellement je regrette, mais encore une fois on ne refait pas l'histoire) ou déjà des centrales, ou qui pourraient en avoir sans problème (pays "riches" non nucléarisés tels la Norvège, l'Australie ou l'Italie, par exemple...). Bien sur le tableau ci-dessus devrait probablement subir quelques ajustements : j'ai été sévère avec l'Amérique Latine, mais par contre il y a quelques pays d'extrême Orient - l'Afghanistan ? - où la perspective d'avoir des centrales ne m'enchanterait guère, mais disons que ces grandes masses conviennent pour un ordre de grandeur.

Un gros 65% de cette électricité est actuellement faite avec du charbon ou du gaz (le reste est constitué du nucléaire, précisément, et d'hydroélectricité, le solaire et l'éolien étant parfaitement négligeables actuellement). Prenons une émission moyenne de 700 g de CO₂ par kWh (soit 190 g équivalent carbone par kWh), cote mal taillée entre les 900 à 1000 g du charbon et les 430 du gaz (sachant que la part charbon est quasiment double de celle du gaz aujourd'hui) : nucléariser tout ce qui est fossile actuellement dans les "zones éligibles" permettrait alors une économie annuelle de 1,7 gigatonnes (milliards de tonnes) équivalent carbone environ, soit 25% à 30% des émissions humaines de CO₂ fossile.

En ce qui concerne les USA, qui ont produit 3.968 TWh en 2001 dont 810 étaient d'origine nucléaire et 213 d'origine hydraulique, le recours au nucléaire pour 100% de leur production électrique engendrerait une économie de l'ordre de 470 millions de tonnes équivalent carbone, soit pas loin de 30% de leurs émissions, ou encore l'équivalent des émissions totales de la Russie.

Bien sûr, à supposer que les technologies permettent d'élargir l'horizon de "durabilité" du nucléaire, et de faire passer les ressources de 1 siècle environ (pour 17% de l'électricité, soit 6% de l'énergie) à des milliers d'années (pour 80% de l'électricité) soient mises au point (c'est le programme Generation IV) un tel gain n'est pas encore suffisant pour stabiliser la perturbation du climat (une telle stabilisation signifierait une [diminution de 50% des émissions](#) au minimum), mais ce serait une contribution significative si l'objectif mondial devenait effectivement de ramener les émissions mondiales [sous la barre des 3 Gt de carbone](#) le plus vite possible.

Par contre, si notre objectif de société est de [continuer notre "toujours plus" actuel](#), nucléariser toute la production d'électricité ne fait que décaler de 20 ans la courbe des émissions : cela ne suffit pas à éviter les ennuis à terme. C'est bien dans le [contexte d'une](#)

[très forte maîtrise de la consommation énergétique](#) que le nucléaire est un des éléments de réponse appropriés au changement climatique. Sans une telle maîtrise, il fait gagner quelques petites décennies, mais c'est tout.

Le changement climatique et l'énergie : bibliographie

dernière modification : janvier 2009

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Il existe de nombreux ouvrages traitant du climat de notre planète, et de ce qui pourrait se passer à la suite des perturbations que nous provoquons avec nos émissions de [gaz à effet de serre](#). Certains d'entre eux (les plus faciles à trouver à la FNAC, souvent !) sont ouvertement polémiques ; ils ne sont pas traités ci-dessous mais sur [une autre page de mon site](#).

Heureusement, la grande majorité de ce qui se publie sur le climat ne prétend pas remettre en cause les [fondements scientifiques](#) sur lesquels sont basées les conclusions désormais bien connues de la majorité d'entre nous. Par contre, comme le système climatique est quelque chose de compliqué, l'énergie aussi malgré que nous en utilisions tous au quotidien, il est difficile de ne pas faire un peu de physique ou de chimie élémentaire dès que l'on tente de fournir une explication. C'est pour cela que certains ouvrages nécessitent un niveau minimum de culture scientifique pour être compris.

Mais la récompense vient à qui sait prendre le temps de lire (du papier ou sur Internet) : comprendre "comment ça marche" est toujours quelque chose de bien agréable, et surtout c'est un préalable indispensable aux choix éclairés. Nous reprochons suffisamment à nos élus de décider sans savoir de quoi il retourne pour ne pas faire de même !

Voici tout d'abord un tableau des parutions **dont l'auteur ou l'un des co-auteurs est directement impliqué dans l'une des [disciplines "majeures" de la science](#)**, et que j'ai lues. Les informations de certains de ces ouvrages m'ont du reste été précieuses pour la réalisation de cette [rubrique sur le changement climatique](#).

Titre	Auteur(s)	Année parution	Nb pages	prix (approx.)	Editeur	Niveau minimum à mon sens
-------	-----------	-------------------	-------------	-------------------	---------	------------------------------

<u>Techniquide de la météo</u>	Jean-Louis Vallée	2004	220	22 E	Nathan	Tous publics
<u>Le climat, Jeu dangereux</u>	Jean Jouzel & Anne Debroise	2004	250	19 E	Dunod	Tous publics
<u>Combien pèse un nuage ?</u>	Jean-Pierre Chalon	2002	185	17 E	EDP Sciences	Premier cycle universitaire (sciences)
<u>Climate Change 2001, The Scientific Basis</u> (en anglais)	Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, <u>GIEC</u> en français)	2001	850 (en A4)	150 E	Cambridge University Press	Deuxième cycle universitaire (sciences)
<u>La Terre chauffe-t-elle ?</u>	Gérard Lambert	2001	220	15 E	EDP Sciences	Terminale scientifique
<u>L'effet de serre</u>	Hervé Le Treut et Jean-Marc Jancovici	2004	220	8 E (poche)	Flammarion (coll. Dominos)	Terminale scientifique
<u>Climats d'hier à demain</u>	Sylvie Jousseau	1999	140	30 E	CNRS Editions	Premier cycle universitaire (sciences)
<u>Les eaux du ciel</u>	Robert Kandel	1998	320	18 E	Hachette	Premier cycle universitaire (sciences)
<u>L'air de notre Temps</u>	Gérard Lambert	1995	240	20 E	Le Seuil	Premier cycle universitaire (sciences)
<u>Le climat de la Terre</u>	Robert Sadourny	1994	120	6 E (poche)	Flammarion (coll. Dominos)	Terminale scientifique
<u>Gros temps sur la planète</u>	Jean-Claude Duplessy et Pierre Morel	1990	300	7,5 E (poche)	Odile Jacob	Premier cycle universitaire (sciences)
<u>Ozone, l'équilibre rompu</u>	Gérard Mégie	1989	250	23 E	Presses du CNRS	Premier (second ?) cycle universitaire (sciences)
<u>La Terre est un être vivant (l'hypothèse Gaïa)</u>	James Lovelock	1979	170 (poche)	10 E	Flammarion	Terminale scientifique

Voici maintenant quelques autres ouvrages sur le climat, parfois plus anciens, **dont l'auteur est également un chercheur directement concerné**, dont je sais qu'ils ne sont pas ouvertement polémiques, mais que je n'ai pas (encore ?) lus.

Titre	Auteur(s)	Année parution	Editeur
L'homme et le climat - une liaison dangereuse	Edouard Bard	2005	Gallimard
Le climat de nos ancêtres à nos enfants	Valérie Masson, Bérangère Dubrulle et Cécile Gambini	2005	Le Pommier
Le climat	Jean-Louis Fellous	2005	Le Cavalier Bleu
Le changement climatique	Hervé Le Treut et Guy Jacques	2004	Editions de l'Unesco
Climat : chronique d'un bouleversement annocé	Didier Hauglustaine, Hervé Le Treut et Jean Jouzel	2004	Le Pommier
L'effet de serre : Réalité, conséquences et solutions	René Ducroux, Philippe Jean-Baptiste	2004	Editions du CNRS
Le réchauffement climatique	Robert Kandel	2004	PUF
Qu'est-ce que l'effet de serre ?	Michel Petit	2003	Vuibert
L'incertitude des climats	Robert Kandel	1998	Hachette
Quand l'océan se fâche	Jean-Claude Duplessy	1996	Odile Jacob
L'homme et le climat	Jacques Labeyrie	1985, réédité 1993	Seuil (pour la réédition)
Glaces de l'Antarctique	Claude Lorius	1992	Odile Jacob
Histoire du climat depuis l'an mil	Emmanuel Le Roy Ladurie	1967	Flammarion

Voici ensuite quelques autres ouvrages sur le climat, **dont l'auteur (moi compris) n'est pas un chercheur directement concerné**, mais dont l'intention est clairement didactique et non ouvertement polémique (chacun reste par contre libre de ses conclusions).

Titre	Auteur(s)	Année parution	Editeur
<u>Le changement climatique expliqué à ma fille</u>	Jean-Marc Jancovici	2009	Le Seuil
<u>Atlas de la menace climatique</u>	Frédéric Denhez	2005	Autrement
Domestiquer l'effet de serre	Francis Meunier	2005	Dunod
Le changement climatique	Yves Sciama	2005	Larousse (petite encyclopédie)
<u>L'Avenir Climatique</u>	Jean-Marc Jancovici	2002	Le Seuil
Quel Climat pour demain ?	Sylvestre Huet	2000	Calmann-Lévy
<u>La Terre Brûle-t-elle ?</u>	Cédric Philibert	1990	Calmann-Lévy

Voici enfin quelques ouvrages portant sur l'énergie, que j'ai lus. Les émissions de gaz à effet de serre provenant pour une large part de l'utilisation de l'énergie, ces ouvrages permettent d'aborder ce sujet, généralement peu évoqué dans les ouvrages sur le climat rédigés par les physiciens. Le pétrole, ses enjeux, son avenir

Titre	Auteur(s)	Année	Nb pages	prix (approx.)	Editeur	Niveau minimum à mon sens
<u>Le Plein s'il vous plaît !</u>	Alain Granjean et Jean-Marc Jancovici	2006	200	18 E	Le Seuil	Tous publics
<u>Pétrole et gaz naturel, comprendre l'avenir</u>	Pierre-René et Emmanuelle Bauquis	2005	150	29 E	Hirle	Tous publics
<u>Une radioactivité de tous les diables</u>	Gérard Lambert	2004	200	15 E	EDP Sciences	Terminale scientifique
<u>L'énergie nucléaire a-t-elle un avenir ?</u>	Hervé Nifenecker	2003	60	4 E	Le Pommier	Tous publics
<u>L'énergie</u>	Christian Ngo	2002	150	16 E	Dunod	Premier cycle universitaire
<u>Quelle énergie pour</u>	Pierre Bacher	2000	200	15 E	Nucléon	Tous publics

<u>demain ?</u>						
<u>Nuclear Power and Health</u>	Organisation Mondiale de la Santé	1994	140	15 E	<u>World Health Organization</u>	Premier cycle universitaire
<u>Elements de Sûreté nucléaire</u>	Jacques Libmann	2000	560	53 E	EDP Sciences	Deuxième cycle universitaire
<u>Energie, un défi planétaire</u>	Benjamin Dessus	1999	200	15 E	Belin	Premier cycle universitaire
<u>L'Environnement en France</u>	Institut Français de l'Environnement	1998	470	38 E	La Découverte	Plus ou moins tous publics
<u>L'énergie, chiffres clés</u>	Observatoire de l'Energie (Ministère de l'Industrie)	tous les ans	170	23 E	Ministère de l'Industrie	(presque) tous publics

Et pour finir, quelques ouvrages scientifiques ou non, dont le lien avec l'avenir climatique ne sautera peut-être pas aux yeux, mais qui comportent des considérations à mon sens fort utiles pour élargir le propos et spéculer sur les possibilités dont dispose notre espèce pour s'éviter des ennuis à l'avenir, ou mieux comprendre les jeux d'acteurs.

Titre	Auteur(s)	Année de parution	Nb pages	prix (approx.)	Editeur	Niveau minimum à mon sens
<u>Effondrement</u>	Jared Diamond	2006	400	29,50E	Gallimard	Tous publics
<u>Dans les coulisses de Greenpeace</u>	Philippe Lequenne	1997	205	Epuisé ?	L'Harmattan	Tous publics
<u>La Décroissance</u>	Nicholas Georgescu Roegen	1995	220	21 E	Sang de la Terre	Premier cycle universitaire (pas nécessairement scientifique)
<u>La Terre est un être vivant (l'hypothèse Gaïa)</u>	James Lovelock	1979	170 (poche)	10 E	Flammarion	Terminale scientifique

<u>De la Démocratie en Amérique</u>	Alexis de Tocqueville	1835/1840	1000 (format poche)	15 E (2 tomes)	plusieurs en poche	tous publics
---	-----------------------	-----------	------------------------	----------------	--------------------	--------------

Encore une fois, les ouvrages qui n'ont pas pour but d'expliquer comment fonctionne le climat et sa modification, mais juste de remplir les poches d'un éditeur (ce qui n'est pas illégitime, même pour les livres pédagogiques, car un éditeur est avant tout une société commerciale !), sont [traités sur une page à part](#).

Pages sur le réchauffement climatique et l'énergie : remerciements (chaleureux, bien sûr !)

dernière version : août 2007

site de l'auteur : www.manicore.com - contacter l'auteur : jean-marc@manicore.com

Ce qui figure sur mes diverses pages consacrées au [réchauffement climatique](#) ou à [l'énergie](#) n'est pas sorti d'un chapeau : cela dérive de ce que j'ai pu entendre à des conférences, [lire](#), obtenir comme renseignements en enquiquinant les experts français, ou de calculs que j'ai pu faire [à titre professionnel](#) ou personnel.

Mon site ne fait l'objet d'aucune procédure de validation formelle quelconque. Le fait pour une personne d'être citée ici **ne l'engage donc en rien**. Elle n'a pas nécessairement vérifié qu'elle est correctement citée (j'essaye de ne pas me tromper, mais tout le monde fait des erreurs !), et encore moins qu'elle partage automatiquement mes opinions ou conclusions (ni que moi je partage les siennes !). Cette citation signifie simplement, comme dans la littérature scientifique, que je me suis appuyé sur des informations publiées ou communiquées par elle, et que je l'en remercie sincèrement.

En conclusion de ce qui précède :

j'assume seul mes erreurs (mais si vous pensez en avoir trouvé une, merci de me [la signaler](#) !).

j'assume également seul mes conclusions et prises de position, dès qu'une phrase va au-delà du simple exposé des faits.

Maintenant, sans les personnes dont les noms figurent ci-dessous, une grosse partie de ce site n'aurait pas existé. J'espère n'avoir pas oublié trop de monde !

Par ordre alphabétique

Florence APTEL - documentaliste au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

André AURENGO - Chef du Service de Médecine Nucléaire à La Pitié-Salpêtrière

Denis BABUSIAUX - Economiste à l'[Institut Français du Pétrole](#)

Jean-Louis BAL - Directeur des énergies renouvelables à l'[Ademe](#)

Edouard BARD - Professeur au [Collège de France](#) et chercheur au [CEREGE](#)

Bertrand BARRE - Ancien directeur de la recherche sur les réacteurs nucléaires civils au [CEA](#),

Pierre-René BAUQUIS - Ancien directeur de la stratégie de [Total](#), actuellement professeur à Total Professeur Associés

Jean-Jacques BECKER - Haut fonctionnaire au [Ministère de l'Agriculture](#)

André BERGER - Directeur de Recherches à l'[Institut d'Astronomie et de Géophysique Georges Lemaître](#), Université Catholique de Louvain

Jean-Pierre BESANCENOT - Directeur de Recherches à la Faculté de Médecine de Dijon

Pierre BESSEMOULIN - président de la Commission de Climatologie de l'[Organisation Météorologique Mondiale](#)

Richard BETTS - Chercheur au [Hadley Centre](#)

Olivier BOUCHER - Chercheur au [Hadley Centre](#)

Jean-Pierre BOURDIER - Ancien directeur de l'environnement d'[EDF](#)

François-Marie BREON - Chercheur au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Pierre CELLIER - Chercheur à l'[INRA](#)

Jérôme CHAPPELLAZ - Directeur adjoint du [Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement](#)

Philippe CIAIS - Chercheur au [Laboratoire de Météorologie Dynamique - Institut Pierre Simon Laplace](#)

Michel COHEN DE LARA - Enseignant-Chercheur à l'[ENPC](#)

Jean COIFFARD - Directeur du [CEREN](#)

Patrick CRIQUI - Chercheur au [LEPII](#)

Christine CROS - Anciennement à l'[ADEME](#)

Gilles DELAYGUE - Chercheur au [CEREGE](#)

Richard DELECOLLE - Chercheur à l'[INRA](#)

Benjamin DESSUS - Ancien directeur du programme [ECODEV - CNRS](#)

Jean-Louis DUFRESNE - Chercheur au [Laboratoire de Météorologie Dynamique - Institut Pierre Simon Laplace](#)

Jean-Pierre DULPHY - Chercheur à l'[INRA](#)

Jean-Claude DUPLESSY - Directeur de Recherches au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Jean-Luc DUPOUEY - Chercheur à l'[INRA](#)

Bernard DURAND - Ancien chercheur à l'[Institut Français du Pétrole](#)

Pierre FRIEDLINGSTEIN - Chercheur au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Olivier GODARD - Directeur de Recherches au [Laboratoire d'économétrie de l'Ecole polytechnique](#)

Jacques GRINEVALD - Enseignant à l'[Université de Genève](#)

Didier HAUGLUSTAINE - Directeur de Recherches au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Stéphane HIS - Chercheur à l'[Institut Français du Pétrole](#)

Charles HOURCADE - Directeur du [Centre International de Recherches et d'Etudes sur le Développement](#)

Philippe JEAN-BAPTISTE - Directeur de Recherches au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Jean JOUZEL - Directeur de Recherches au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Anne JUILLET - Chercheur à l'[Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Jean LAHERRERE - Consultant pétrolier.

Gérard LAMBERT - Physicien retraité, ancien chercheur au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#),

Richard LAVERGNE - Secrétaire Général de l'[Observatoire de l'Energie](#)

Hervé LE TREUT ([mon co-auteur](#), quel honneur !) - Directeur du [Laboratoire de Météorologie Dynamique - Institut Pierre Simon Laplace](#)

Benoît LEBOT - [Programme des Nations Unies pour le Développement](#)

Laurent LI - Chercheur au [Laboratoire de Météorologie Dynamique - Institut Pierre Simon Laplace](#)

Yves MARTIN - Ex-président de section au Conseil Général des Mines ; [Ministère de l'Industrie](#)

Valérie MASSON - Chercheur au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Stéphane HIS - Chercheur à l'[Institut Français du Pétrole](#)

Yves MATHIEU - Chercheur à l'[Institut Français du Pétrole](#)

Gérard MEGIE († 2004) - Professeur d'aéronomie à l'université de Paris 6 Jussieu, président du [CNRS](#), membre de l'[Institut](#).

Marie-Antoinette MELIERES - Chercheur à l'université de Grenoble, [Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement](#)

Christian NGO - Délégué Général d'[Ecrin](#), Ex-directeur scientifique de la Direction de la Technologie du [CEA](#)

Nathalie De NOBLET - Chercheur au [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement](#)

Jane NOPPE - [Ademe](#)

Jean-Pierre ORFEUIL - ex-Chercheur à l'[INRETS \(Institut National de Recherches et d'Etudes sur les Transports et leur Sécurité\)](#), Université de Paris 12

Michel PETIT - ancien directeur de la Recherche de l'[Ecole Polytechnique](#), ancien membre du bureau du [GIEC](#)

Cédric PHILIBERT - économiste à l'[Agence Internationale de l'Energie](#) (site personnel : <http://philibert.cedric.free.fr>)

Dominique RAYNAUD - Directeur de Recherches au [Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement](#)

Catherine RITZ - Chercheuse au [Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement](#)

Maria Fernanda SANCHEZ GONI - Chercheur au Département de Géologie et Océanographie, [UMR-CNRS 5805 EPOC, Université Bordeaux 1](#)

Bernard SAUGIER - Directeur du [Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale de Paris XI-Orsay](#)

Bernard SEGUIN - Directeur de Recherches à l'[INRA](#)

Olivier SIDLER - Directeur d'[Enertech](#)

Jean-Pierre TRAISNEL - Chercheur au [CNRS LTMU](#), Institut Français d'Urbanisme

Alain-Jacques VALLERON, Directeur de l'[Unité 444 de l'INSERM](#)